

ISSN 2078-9181

DOI 10.15622/sp.55

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

# ТРУДЫ СПИИРАН

proceedings.spiiras.nw.ru



ВЫПУСК 6(55)



Санкт-Петербург  
2017

18+

# SPIIRAS PROCEEDINGS

Issue № 6(55), 2017

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

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

---

## Founder and Publisher

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

---

## Editor-in-Chief

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

---

## Editorial Board Members

<b>A. A. Ashimov</b> ,	Prof., Dr. Sci., Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
<b>S. N. Baranov</b> ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>N. P. Veselkin</b> ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
<b>V. I. Gorodetski</b> ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>O. Yu. Gusikhin</b> ,	Ph. D., Dearborn, USA
<b>V. Delic</b> ,	Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia
<b>A. Dolgui</b> ,	Prof., Dr. Habil., St. Etienne, France
<b>M. Zelezny</b> ,	Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech Republic
<b>I. A. Kalyaev</b> ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Taganrog, Russia
<b>D. A. Ivanov</b> ,	Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany
<b>G. A. Leonov</b> ,	Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia
<b>K. P. Markov</b> ,	Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan
<b>Yu. A. Merkurjev</b> ,	Prof., Dr. Habil., Academician of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia
<b>R. V. Meshcheryakov</b> ,	Prof., Dr. Sci., Tomsk, Russia
<b>N. A. Moldovian</b> ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>V. E. Pavlovskiy</b> ,	Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia
<b>A. A. Petrovsky</b> ,	Prof., Dr. Sci., Minsk, Belarus
<b>V. A. Putilov</b> ,	Prof., Dr. Sci., Apatity, Russia
<b>V. K. Pshikhopov</b> ,	Prof., Dr. Sci., Taganrog, Russia
<b>A. L. Ronzhin</b>	(Deputy Editor-in-Chief), Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>A. I. Rudskoi</b> ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
<b>V. Sgurev</b> ,	Prof., Dr. Sci., Academician of the Bulgarian academy of sciences, Sofia, Bulgaria
<b>V. Skormin</b> ,	Prof., Ph.D., Binghamton, USA
<b>A. V. Smirnov</b> ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>B. Ya. Sovetov</b> ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAE, St. Petersburg, Russia
<b>V. A. Soyfer</b> ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Samara, Russia
<b>B. V. Sokolov</b> ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>L. V. Utkin</b> ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>A. L. Fradkov</b> ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>L. B. Sheremetov</b> ,	Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico, Mexico

---

**Editor:** E. P. Miroshnikova

**Technical editor:** A. I. Motienko

**Translator:** P. N. Emeleva

---

## 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/>

**The journal is indexed in Scopus**

© St. Petersburg Institute for Informatics and Automation  
of the Russian Academy of Sciences, 2017

# ТРУДЫ СПИИРАН

Выпуск № 6(55), 2017

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**, академик РАН, д-р техн. наук, профессор, 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**, академик РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
**В. С. 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 РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
**В. А. Сойфер**, академик 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  
**Л. Б. Шереметов**, д-р техн. наук, Мехико, Мексика

---

**Редактор:** Е. П. Мирошникова

**Технический редактор:** А. И. Мотиечко

**Переводчик:** П. Н. Емелева

---

## Адрес редакции

199178, 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/>

## Журнал индексируется в международной базе данных Scopus

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, 2017  
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»

## CONTENTS

<b><i>SPIIRAS — 40 Years of Scientific Activity</i></b>	5
<b><i>Methods of Information Processing and Control</i></b>	
V.I. Gorodetsky, P.O. Skobelev INDUSTRIAL APPLICATIONS OF MULTI-AGENT TECHNOLOGY: REALITY AND PERSPECTIVES	11
V.V. Arkhipov, V.B. Naumov ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND AUTONOMOUS DEVICES IN LEGAL CONTEXT: ON DEVELOPMENT OF THE FIRST RUSSIAN LAW ON ROBOTICS	46
S.A. Alexandrova, S.V. Bystrov, N.A. Vunder, O.V. Slita, A.V. Ushakov CONTINUOUS ROBUST SYSTEM SYNTHESIS BASED ON MINIMIZATION OF ESTIMATION OF THE RELATIVE INTERVALITY OF TRACE OF THE STATE MATRIX	63
V.A. Zelentsov, S.A. Potryasaev ARCHITECTURE AND EXAMPLES OF IMPLEMENTING THE INFORMATIONAL PLATFORM FOR CREATION AND PROVISION OF THEMATIC SERVICES USING EARTH REMOTE SENSING DATA	86
S.I. Kolesnikova A MULTIPLE CONTROL SYSTEM FOR A NON-LINEAR OBJECT WITH UNCERTAINTY	114
D.V. Uchaev, I.G. Zhurkin, Dm.V. Uchaev USING CHEBYSHEV MOMENTS TO SOLVE PROBLEMS OF SUPPRESSION OF HIGH-FREQUENCY NOISES IN FIELDS OF GRAVITATIONAL ANOMALIES	134
<b><i>Information Security</i></b>	
I.V. Kotenko, I.B. Saenko, M.A. Kotsynyak, O.S. Lauta ASSESSMENT OF CYBER-RESILIENCE OF COMPUTER NETWORKS BASED ON SIMULATION OF CYBER ATTACKS BY THE STOCHASTIC NETWORKS CONVERSION METHOD	160
M.V. Gofman, A.A. Kornienko, E.T. Mironchikov, A.B. Nikitin DIGITAL WATERMARKING OF AUDIO SIGNALS FOR ROBUST HIDDEN AUDIO COMMUNICATION VIA AIR AUDIO CHANNEL	185
<b><i>Algorithms and Software</i></b>	
D.A. Kocharov, A.P. Menshikova DETECTION OF PROMINENT WORDS IN RUSSIAN TEXTS USING LINGUISTIC FEATURES	216
N.A. Ermolin, V.V. Mazalov, A.A. Pechnikov GAME-THEORETIC METHODS FOR FINDING COMMUNITIES IN ACADEMIC WEB	237
<b><i>Jubilee of SPIIRAS Researchers</i></b>	255

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СПИИРАН — 40 лет научной деятельности</b>	5
<b>Методы управления и обработки информации</b>	
В.И. Городецкий, П.О. Скобелев МНОГОАГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ: ПЕРСПЕКТИВА	11
В.В. Архипов, В.Б. Наумов ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОНОМНЫЕ УСТРОЙСТВА В КОНТЕКСТЕ ПРАВА: О РАЗРАБОТКЕ ПЕРВОГО В РОССИИ ЗАКОНА О РОБОТОТЕХНИКЕ	46
С.А. Александрова, С.В. Быстров, Н.А. Вундер, О.В. Слита, А.В. Ушаков СИНТЕЗ РОБАСТНОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МИНИМИЗАЦИИ ОЦЕНКИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ИНТЕРВАЛЬНОСТИ СЛЕДА ЕЕ МАТРИЦЫ СОСТОЯНИЯ	63
В.А. Зеленцов, С.А. Потрясаев АРХИТЕКТУРА И ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ СЕРВИСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	86
С.И. Колесникова КОНСТРУИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ	114
Д.В. Учаев, И.Г. Журкин, Дм.В. Учаев ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОМЕНТОВ ЧЕБЫШЕВА В ЗАДАЧАХ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ В ПОЛЯХ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ	134
<b>Информационная безопасность</b>	
И.В. Котенко, И.Б. Саенко, М.А. Коцыняк, О.С. Лаута ОЦЕНКА КИБЕРУСТОЙЧИВОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИБЕРАТАК МЕТОДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	160
М.В. Гофман, А.А. Корниенко, М.В. Мирончиков, А.Б. Никитин ЦИФРОВОЕ МАРКИРОВАНИЕ АУДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ РОБАСТНОЙ СКРЫТОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ ВОЗДУШНЫЙ АУДИОКАНАЛ	185
<b>Алгоритмы и программные средства</b>	
Д.А. Кочаров, А.П. Меньшикова ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТОНАЦИОННО ВЫДЕЛЕННЫХ СЛОВ В РУССКОЯЗЫЧНОМ ТЕКСТЕ	216
Н.А. Ермолин, В.В. Мазалов, А.А. Печников ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫЕ МЕТОДЫ НАХОЖДЕНИЯ СООБЩЕСТВ В АКАДЕМИЧЕСКОМ ВЕБЕ	237
<b>Юбилеи ученых СПИИРАН</b>	255

## **СПИИРАН — 40 ЛЕТ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

### **ВКЛАД В РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЩЕСТВА В РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (далее Институт) организован в соответствии с Распоряжением Совмина СССР от 19.12.1977 и постановлением Президиума АН СССР от 19.01.1978 на базе отдела вычислительной техники Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе АН СССР как Ленинградский научно-исследовательский вычислительный центр АН СССР (ЛНИВЦ). В 1985 году ЛНИВЦ решением Президиума АН СССР преобразован в Ленинградский институт информатики и автоматизации АН СССР.

К 1991 году Институт вырос в крупное научно-исследовательское учреждение, на базе научных подразделений которого были организованы новые учреждения — Центр экологической безопасности Санкт-Петербургского Научного центра РАН (СПБНЦ РАН) и Межведомственный координационный совет СПБНЦ РАН. В 1992 году после возвращения городу Ленинграду исторического названия Санкт-Петербург Институт переименован в Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2013 г. № 2591-р Институт, как и другие учреждения РАН, передан в ведение Федерального агентства научных организаций (ФАНО России).

Научно-методическое руководство деятельностью Института осуществляет Российская академия наук, Отделение нанотехнологий и информационных технологий. Основателем и первым директором Института стал доктор технических наук, профессор Пономарев Валентин Михайлович. С февраля 1991 г. по настоящее время директором Института является член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор Юсупов Рафаэль Мидхатович.

Целью и предметом деятельности Института является проведение фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований, направленных на получение новых знаний в области информатики и информатизации, методов управления и информационно-коммуникационных технологий для решения актуальных научно-технических и социально-экономических проблем. Проведение фундаментальных, поисковых и прикладных

научных исследований на первом этапе существования Института осуществлялось по следующим основным направлениям: вычислительные комплексы коллективного пользования, компьютеризация и автоматизация научных исследований, проектирования, управления и производства. С начала 90-х годов в Институте начали проводиться исследования в области информатизации общества, интеллектуальных информационно-коммуникационных технологий для различных сфер деятельности, информационной безопасности, робототехники, биомедицинской информатики, цифровой экономики.

Тематика работ Института с первых дней его существования практически соответствовала прорывным направлениям, сформулированным в последующем в руководящих документах: «Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы», «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации», Государственная программа «Цифровая экономика Российской Федерации».

К 1983 году в Институте был создан самый мощный в стране на то время вычислительный комплекс, ресурсами которого пользовались около 2000 специалистов из 82 организаций в основном в режиме удаленного доступа. Параллельно была разработана и создана одна из первых в стране глобальных информационно-вычислительных сетей — Академсеть «Северо-Запад». Сеть объединяла терминалы удаленного доступа более 40 организаций Ленинграда и других городов (Москва, Петрозаводск, Таллин). Были разработаны связанные с сетью системы автоматизации научных исследований, что позволило создать на нескольких предприятиях Ленинграда интегрированные производственные комплексы, в которых автоматизируется весь жизненный цикл изделия «от разработки новой продукции до ее выпуска» (по сути — прообраз «промышленного интернета»).

С учетом научных достижений Института и накопленного опыта их практической реализации Институту было поручено научное сопровождение Целевой комплексной территориально-отраслевой программы развития народного хозяйства Ленинграда и Ленинградской области на основе автоматизации и широкого использования вычислительной техники на 1984–1985 годы и до 1990 года «Интенсификация-90». В результате реализации программы по среднегодовым темпам роста производительность труда в промышленности увеличились в 1,5 раза по сравнению с предыдущей пятилеткой.

В девяностые годы прошлого века в развитии Института начался второй этап, который совпал с мировой тенденцией — процессом формирования информационного общества (общества знаний) как средства социально-экономического развития общества и обеспечения его национальной безопасности. Именно в эти годы под руководством директора Института Р.М. Юсупова были разработаны концептуальные основы информатизации, структурные и экономико-математические модели информационного общества, базирующиеся на наличии в информационном обществе двух секторов экономики: традиционного и информационного, основанного на знаниях. Результаты этих работ вывели Институт в ряд одного из ведущих отечественных научных учреждений в области информатизации общества и оказали ощутимое влияние на этот процесс не только в городе, но и в стране. Учеными Института разработаны научно-методологические основы информатизации общества. С их участием созданы концепция информатизации Санкт-Петербурга, стратегия его перехода к информационному обществу, концептуальные основы информационной политики, принятые Администрацией Санкт-Петербурга в качестве руководящих документов. Разработан ряд модельных законов для государств-участников Содружества Независимых Государств, в частности, об информатизации, о критически важных объектах инфокоммуникационной инфраструктуры, обеспечения информационной безопасности и так далее. Ряд подобных законов разработан также для государств — членов Организации Договора о коллективной безопасности.

Прикладные результаты исследований Института ориентированы на создание технологий, соответствующих Перечню критических технологий Российской Федерации. В числе разработок Института — широкий спектр современных информационных технологий:

- технология анализа и обработки больших данных (Big data) для решения задач обнаружения закономерностей, машинного обучения, построения моделей оценивания, прогнозирования и принятия решений на конечном множестве альтернатив;

- технология и программные средства анализа и агрегации больших массивов гетерогенных данных для мониторинга и управления безопасностью распределенной сети электронных потребительских устройств (Интернет вещей);

- технология построения систем поддержки принятия решений на основе взаимодействия человека-машинных облачных



сервисов в онтолого-ориентированных интеллектуальных информационных пространствах;

– технология поддержки взаимодействия автономных робототехнических систем и пользователей в групповом поведении в окружающем киберфизическом пространстве;

– технология проектирования и производства бортовых вычислительных модулей для обработки сенсорной информации и управления активационными устройствами во встраиваемых системах и мобильных робототехнических комплексах;

– технология и компьютерная система паралингвистического анализа естественной речи для автоматического распознавания эмоциональных состояний человека по речи и классификации речевых паралингвистических явлений;

– методология импортозамещения компонентов аппаратного обеспечения их программными реализациями на основе развития концепции программно-определяемых систем;

– технология и программный комплекс решения математических задач прогнозного оценивания, анализа и синтеза характеристик систем и процессов их функционирования по показателям их операционных свойств;

– технология оценивания устойчивости работы информационной системы в условиях социоинженерных атакующих воздействий;

– технология построения многоуровневой геоинформационной интеллектуальной системы освещения наземной, надводной, подводной, воздушной и космической обстановки и поддержки принятия решений.

Перечисленные технологии готовы к реализации, ряд из них внедрен в научно-исследовательских и промышленных организациях и, что особенно важно, на практике решают задачи импортозамещения. Часть результатов имеет двойное назначение.

За прошедшие 40 лет Институт выполнил около 100 НИР и ОКР по следующим основным направлениям, связанным с оборонной тематикой и обеспечения национальной безопасности Российской Федерации: проблемы информационной безопасности и защиты информации в инфокоммуникационных комплексах и сетях; новые методы получения обработки и интеграции данных, информации и знаний; проблемы создания и применения межвидовых интегрированных информационных интеллектуальных технологий и систем поддержки принятия решений. В результате осуществлено создание научно-методологического, методического и технического

задела, необходимого для решения задач обеспечения технологической независимости российских разработчиков от зарубежных производителей в области проектирования, создания, эксплуатации и модернизации АСУ и специальной техники, качественного повышения уровня ее готовности, своевременности, обоснованности и гибкости формирования и реализации принимаемых решений и управляющих воздействий.

Основу научно-экспериментальной базы Института составляют высокопроизводительные вычислительные кластеры, Компьютерный научно-образовательный центр, Научно-образовательный центр «Технологии интеллектуального пространства», Инновационно-образовательный центр космических услуг, созданный по соглашению с Роскосмосом, Учебный центр для подготовки сертифицированных специалистов в области обработки данных дистанционного зондирования Земли.

Развивая интеграцию фундаментальной науки и высшего образования, ученые Института активно участвуют в реализации научно-образовательных программ в ведущих университетах Санкт-Петербурга. Институт имеет 6 базовых кафедр в вузах города и 9 совместных научно-исследовательских лабораторий в университетах города и России.

В Институте открыта аспирантура и работает диссертационный совет по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук по специальностям: 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» (технические системы) по техническим наукам; 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» по техническим наукам; 05.13.19 «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность» по техническим наукам. В аспирантуре производится обучение по направлениям 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» (направленности «Системный анализ, управление и обработка информации» и «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей») и 10.06.01 «Информационная безопасность» (направленность «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность»). В аспирантуре подготовлено свыше 100 кандидатов и 45 докторов наук.

При Институте организованы Музей СПИИРАН и Музей истории школы К. Мая, среди выпускников которой — выдающиеся ученые, художники, писатели, композиторы, государственные деятели: члены Госсовета, министры, губернаторы, космонавты

Г.М. Гречко и А.И. Борисенко, генералы, адмиралы, в том числе 39 академиков Академии наук и Академии художеств. Используя потенциал Музея, ученые Института ведут просветительскую и воспитательную работу со школьниками и студентами образовательных организаций Санкт-Петербурга и других городов, пропагандируя лучшие научные, педагогические и культурно-нравственные традиции российского образования и науки.

Институт организует и активно участвует в российских и зарубежных научных конференциях и выставках, его ученые входят в редакционные советы ряда отечественных и зарубежных журналов. Сотрудниками Института опубликовано более 100 монографий и 10000 статей в отечественных и зарубежных издательствах. За 40 лет Институтом издано более 90 выпусков научных журналов и сборников. Издаваемый с 2002 года научный журнал Института «Труды СПИИРАН» в 2011 году включен в перечень журналов ВАК России, а с 2016 года индексируется в международной базе данных Scopus.

Сегодня в Институте работают: 1 член-корреспондент РАН, 12 заслуженных деятелей науки Российской Федерации, 1 профессор РАН, более 40 докторов наук и 60 кандидатов наук. За время работы в Институте его сотрудники удостоены 32 государственных наград, 19 сотрудников являются лауреатами премий Правительства Российской Федерации и Правительства Санкт-Петербурга, 10 сотрудников удостоены стипендий Президента Российской Федерации, 18 сотрудников получили гранты Президента Российской Федерации.

За 40-летнюю историю Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук закрепил за собой статус одного из ведущих научных центров Северо-Запада в области информатики и автоматизации и успешно продолжает исследования по созданию и внедрению стратегических цифровых технологий и роботизированных систем в интересах укрепления обороноспособности России, обеспечения безопасности и повышения качества жизни граждан.

В.И. ГОРОДЕЦКИЙ, П.О. СКОБЕЛЕВ  
**МНОГОАГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ  
ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ: РЕАЛЬНОСТЬ И  
ПЕРСПЕКТИВА**

*Городецкий В.И., Скобелев П.О. Многоагентные технологии для индустриальных приложений: реальность и перспектива.*

**Аннотация.** Уже в течение более чем четверти века технология многоагентных систем рассматривается как одна из наиболее перспективных технологий концептуализации и программной реализации сложных распределенных систем. Однако на практике происходит совсем иное: индустрия почти не использует эту технологию, и это несмотря на то, что появляются все новые и новые классы приложений, для которых эта технология представляется чуть ли ни единственно возможной технологией разработки. В статье анализируются недавние прогнозы и реальные достижения в части практического применения многоагентных систем на промышленном уровне. Выявляются проблемы, которые в настоящее время препятствуют широкому промышленному внедрению многоагентных систем и технологий, а также пути их преодоления. Анализируются классы приложений, в реализации которых многоагентные технологии имеют неоспоримые преимущества и оцениваются перспективы развития этих технологий до уровня индустриального применения.

**Ключевые слова:** многоагентные системы, индустриальные приложения, дорожная карта MAS, взаимодействие агентов, протокол взаимодействия, интернет вещей.

**1. Введение.** Сообщество специалистов в области интеллектуальных информационных технологий (ИТ) уже более десяти последних лет относит многоагентные системы (MAS) и технологии (MAS-технологии) к числу наиболее перспективных средств разработки сложных систем. Но почему-то ИТ-индустрия не спешит их использовать, несмотря на то, что эта технология продолжает развиваться учеными и специалистами многих ведущих университетов мира. С другой стороны, появляются новые задачи и новые классы приложений, которые как будто специально созданы для применения MAS. Прежде всего это относится к широкому классу мобильных приложений, к приложениям в области облачных сервисов и Интернета вещей, коллективной робототехники, человеко-машинных робототехнических систем и другим актуальным приложениям.

Мировое сообщество ученых и специалистов в области MAS предлагает новые модели для современных приложений, активно развивает игровые модели формализации экономических моделей, разрабатывает новые типы аукционов для соперничающих коалиций агентов и роботов, совершенствует логические языки для обеспечения требуемой выразительности BDI-моделей автономных агентов и MAS в различных инновационных приложениях, предлагает адаптивные

механизмы обучения агентов, теоретические методы верификации распределенных МАС, изучает и развивает новые принципы функционирования агентских сообществ и их кооперации и тому подобное. Тем не менее индустрия практически не реагирует на новые модели, методы и архитектуры МАС и на предлагаемые технологии. Естественно, встает вопрос о том, почему это происходит и когда можно ожидать использования многоагентных технологий на индустриальном уровне. Или этого не случится вообще?

Вместе с тем, возможно, что время МАС наступит уже в самом ближайшем будущем, что связано с появлением в последнее время нового понятия «Цифровых экосистем», построенных на конкуренции и кооперации сервисов [1].

Интересно отметить, что это определение существенно сужается Gartner, который говорит лишь об интеграции в «системах систем» [2].

В данной работе проводится сравнительный анализ ожиданий в части индустриального применения МАС-технологий и реального состояния их использования (раздел 2), анализируются причины и проблемы, которые существенно тормозят внедрение технологий МАС в практику (раздел 3), а также предлагаются пути преодоления этих проблем (раздел 4). Основной вывод данной работы состоит в том, что в настоящее время для выхода МАС-технологий на рынок индустриальных применений необходимо пересмотреть некоторые базовые парадигмы в области формализации моделей агентов и МАС, а также технологические аспекты их проектирования и программной реализации. Приводятся примеры успешного использования МАС-технологий для создания интеллектуальных приложений индустриального уровня, однако большинство из них, как показывает анализ, не вполне следуют традиционным моделям и технологии МАС (раздел 5), тем самым подтверждая тезис о необходимости пересмотра базовых технологических аспектов парадигмы МАС.

Представляется, что начавший развиваться в последнее время Интернет агентов, людей и вещей станет новой парадигмой не только для Industry 4.0, направленной на промышленную автоматизацию и интеллектуализацию производств различного типа, но и для Industry 5.0, которая будет в большей степени обращена на развитие человека и поддержку процессов самоорганизации в обществе [3].

## **2. Состояние прикладных разработок в области МАС.**

Концепция МАС была предложена в середине 1980-х годов. Она сразу была высоко оценена как научным, так и индустриальным сообществами. Уже за первые два десятилетия были построены базовые теоретические основы МАС, начались активные разработки в области технологии и инструментальных средств ее поддержки. К

началу 2000-х годов было предложено несколько хорошо продуманных методологий разработки МАС, началась разработка инструментальных программных средств их поддержки. В 1996 г. была создана общественная организация FIPA (от англ. *Foundation for Intelligent Physical Agents*), главной задачей которой было научное обоснование стандартов в области агентов и МАС, а уже в 2005 г. она стала одним из комитетов IEEE по стандартизации. В это время ожидалось, что МАС и соответствующая технология готовы занять место лидирующей принципиально новой парадигмы проектирования и технологии разработки современных распределенных интеллектуальных систем индустриального уровня практически любой сложности, причем для самого широкого спектра приложений.

Тогда казалось, что оснований для такой точки зрения вполне достаточно. Действительно, эта концепция выглядела очень привлекательной и естественной для понимания и применения, поскольку она предлагает строить системы и решать задачи в том же стиле, в каком они решаются в живой природе и человеческом сообществе, в частности путем взаимодействий, лежащих в основе самоорганизации. Основной принцип создания концептуальной модели МАС-приложений использует представление сложной задачи множеством относительно простых замкнутых подзадач. Их решение поручается программными агентам, которые разрабатываются и программируются практически автономно, работают асинхронно и параллельно, и взаимодействуют с помощью простой техники обмена сообщениями на языке, близком к естественному, то есть аналогично тому, как это делается при решении задач в сообществе живых существ, в частности в человеческом сообществе. Это взаимодействие, реализуемое с помощью диалогов и протоколов, может быть достаточно сложным и разнообразным. При этом агенты, используя обмен сообщениями, могут генерировать события и посылать их другим агентам, вырабатывать и согласовывать варианты решений, пересылать данные, оценивать результаты решения своих подзадач, формировать задания для других агентов, поддерживать синхронизацию коллективных действий, передавать сигналы обратной связи и тому подобное. Эта концепция представляется естественной для приложений, в которых участвует много разных участников с собственными интересами или любых других относительно автономных сущностей. Например, это относится к задачам транспортной логистики, где объектами планирования являются отдельные заказы и грузы, а исполнителями плана являются транспортные средства, водители, станции ремонта, заправки и так далее. То же самое относится и к производственной логистике, аналогичными объектами которой являются заказы, отдельные технологические производственные операции, рабочие и станки,

выполняющие эти операции, другие ресурсы и материалы и так далее. Уже в первые годы существования парадигмы автономных агентов и МАС ее идеи были особенно привлекательными для задач индивидуальной и коллективной робототехники, причем настолько привлекательными, что термины *агент* и *робот* обычно просто не различались [4], что сохраняется и по настоящее время. В то же время классы потенциальных приложений для МАС продолжали расширяться. Это прежде всего относится к приложениям, управляющим сложными крупноразмерными объектами сетевой структуры, а приложений подобного рода на практике становится с каждым днем все больше не только на транспорте и в производстве, но и в энергетике, здравоохранении, военном деле и так далее. Наступающая эра Интернета вещей, в приложениях которой центральным аспектом является именно взаимодействие распределенных автономных объектов физического, виртуального и социального миров, порождает новый широкий класс приложений, для которых МАС-технология представляется идеальной. В 2016 году был проведен первый международный семинар «Интернет агентов», на котором основной темой была технология агентов для Интернета вещей и людей [5].

Одной из самых привлекательных сторон МАС-парадигмы является ее способность естественно и эффективно решать самую трудную задачу разработки сложных программ, а именно программирование взаимодействий множества компонент программы. В концепции и технологии МАС, по существу, эта задача отделяется от программирования агентов и реализуется с помощью диалогов и протоколов взаимодействия. Важно отметить, что в своей базовой формулировке парадигма МАС особо акцентирует внимание на этом факте: она формулируется как парадигма *вычислений на основе взаимодействий* (англ. *computation as interactions*) [6]. Концепция обмена сообщениями с использованием диалогов и протоколов для реализации взаимодействий оказалась очень привлекательной и продуктивной на практике. Не случайно она в последующем получила широкое распространение и в других архитектурах и технологиях разработки сложных интеллектуальных систем.

Показателем уровня зрелости разработок в области теории и практики МАС был проект *Agentlink III* Европейской комиссии FP-6 (2004-2005), основным результатом которого стала дорожная карта *Road Map: «Agent Technology: Computing as Interaction»* [6]. Этот документ фактически подвел итоги двадцатилетнего периода развития парадигмы, модели и технологии МАС, дал оценку практических перспектив МАС и, что самое важное, дал предельно оптимистический прогноз перспектив промышленных применений МАС до 2015+ г.

Однако уже в начале 2000-х годов в развитии теории и технологии МАС что-то пошло не так, как ожидалось. И публичное восприятие работ в области МАС стало менее значимым [7]. Удачные разработки этого и более позднего времени в области интеллектуальных приложений, которые были выполнены в этот период ведущими ИТ-компаниями мира, в частности Apple, Facebook, Google, SAP, совсем не были связаны с МАС или с МАС-технологиями, по крайней мере в общественном восприятии. Например, в приглашенном докладе вице-президента и директора автономной лаборатории компании Моторола Дж. Стресснера (John Strassner) на конференции ААМАС 2007 [8] одной из ключевых тем был анализ состояния индустриальных разработок в области МАС-приложений. Автор этого доклада обнаружил не более шести МАС-приложений, разработанных за 20-летнюю историю МАС, которые хоть и приближенно, но могли бы квалифицироваться как индустриальные.

Скотт Делоч (Scott A. DeLoach), профессор Канзасского университета, один из ведущих ученых в области МАС-технологий, под руководством которого разработаны методология *O-MaSE* и инструментальное средство *agentTool*, в работе [9] явно обозначил отсутствие прогресса в широком промышленном применении МАС. По его мнению, несмотря на более чем 20-летние усилия по разработке агентских технологий, сама эта область все еще находится на ранней стадии развития и не достигла достаточной зрелости, например зрелости объектно-ориентированного подхода (ООП). Он отметил также ряд существенных недоработок в области теории и технологии МАС, которые, как он думает, требуют уточнения. Они обсуждаются далее в разделе 3 данной работы. По его мнению, МАС-концепция и МАС-технология должны в первую очередь продемонстрировать свою способность создавать сложные адаптивные и самоорганизующиеся распределенные системы промышленного уровня, но этого пока не случилось и до настоящего времени.

В 2013 году была опубликована заметная работа [7], в которой авторы тщательно проанализировали реальное состояние прикладных разработок в области МАС на тот момент. Общая идея этой весьма своевременной и даже несколько запоздавшей работы сформулирована авторами уже в ее первых строках: *«В то время, как имеются убедительные свидетельства важности МАС и технологий как исследовательской области, остается неясным, какой практический эффект от нее имеется к настоящему времени»*.

Эта работа интересна в нескольких аспектах. Во-первых, она дает детальный обзор прикладных МАС, которые были разработаны к 2012-2013 гг., что позволяет оценить качество прогноза, данного на



этот же срок в дорожной карте [6]. Во-вторых, в ней имеется интересная статистика, которая позволяет более глубоко проанализировать реальное состояние МАС-разработок различного уровня зрелости на 2013 год, то есть за более чем тридцатилетнюю историю их развития, а также выявить некоторые причины неудовлетворительного состояния соответствующих разработок.

Предваряя анализ прикладных разработок в области МАС и технологий, авторы дорожной карты МАС [6] пишут, что за 20 лет исследований и разработок в этой области к 2005 г. технология МАС еще не достигла уровня зрелости, необходимого для их использования в промышленных разработках. В качестве аргумента для оправдания этого факта приводится сравнение возраста МАС-технологий и ООП, замечая при этом, что ООП приобрело практическую значимость за 30 с лишним лет. Например, ООП язык C++ был создан через 32 года, а *JAVA* — через 39 лет после первых работ по ООП. К настоящему времени возраст МАС-технологий приближается уже к 40 годам, но ничего принципиально нового в области МАС-технологий пока не произошло.

Авторы [6] также сетуют на слабость методологий для проектирования МАС, разработанных к тому времени, хотя с этим трудно согласиться. Действительно, к этому времени было создано и уже достаточно длительно тестировалось несколько глубоко проработанных методологий МАС, например *Gaia* [10], *Tropos* [11], *MaSE* [12], *ADELFE* [13], *MESSAGE* [14], *Prometheus* [15] и ряд других. Другое дело, что на то время они еще не были поддержаны адекватными инструментальными средствами. Важно заметить, что активность разработок в области методологий проектирования и инструментальных средств для поддержки программной реализации агентов и МАС была достаточно высокой и после этого (практически до 2010 года), когда было выполнено более десятка новых разработок. Однако большинство из них к настоящему времени постигла одинаковая участь: их разработки и тестирование прекращены, и только небольшое число методологий и инструментов остается предметом второстепенных разработок.

В период после 2005 г. активность исследований и разработок в области МАС-технологий и средств их инструментальной поддержки не снижалась, но тем не менее прогноз развития промышленных МАС-приложений, данный в дорожной карте [6], оказался слишком оптимистичным [7, 16]. Работа [7] анализирует 152 приложения, сведения о которых автору удалось получить либо от авторов разработок, либо из научной литературы. Но важно заметить, что, как позже выяснилось, более половины проанализированных разработок в последующем, к

сожалению, не были подтверждены авторами, так что уровень и само существование этих разработок остается под вопросом [7].

Наиболее заметные и удачные разработки МАС-приложений разного уровня зрелости при различном соотношении автоматической генерации кода и ручного программирования были выполнены в области управления производством, транспортной логистики, в области аэрокосмических приложений и в энергетике. Однако прогноз темпов развития в этих классах приложений, данный в дорожной карте 2005 г. на 2015 г., не оправдался. Но, наверное, самым неожиданным оказалось то, что темпы появления новых разработок МАС-приложений стали постепенно замедляться, и этот факт отражает реальное падение интереса промышленных компаний к МАС-технологии. Практика показала, что многие приложения, для которых МАС-технология рассматривалась как наиболее перспективная технология [6], к 2013 г. были успешно реализованы с помощью других технологий. Среди них наиболее конкурентоспособными оказались сервис-ориентированные технологии, ГРИД-вычисления, автономные, повсеместные, облачные, вычисления и другие, которые появились значительно позже, однако смогли быстро потеснить МАС-технологии.

Работа [7] была одной из первых, в которой явно прозвучали тревожные ноты относительно перспектив МАС-технологий в конкуренции с другими современными интеллектуальными ИТ, которые стали следствием анализа 152 разработок, известных автору. Эти разработки анализировались с различных точек зрения, однако для целей данной работы существенными является оценка их уровня зрелости. С этой точки зрения приложения в [7] разделены на 3 группы:

– *промышленные* системы или близкие к ним; их оказалось 46 из 152;

– *исследовательские программные прототипы промышленного уровня*, которые тестировались на реальных данных, однако не были использованы в реальной работе; таких было 55;

– *лабораторные исследовательские прототипы (пилотные проекты)*, которые использовались в учебных, научных и других подобных целях; их оказалось 46.

Про остальные пять разработок достоверная информация у авторов [7] отсутствовала. Таким образом, менее трети проанализированных приложений оказались достаточно зрелыми, а их общее число в пять раз меньше прогноза дорожной карты [6]. Но только примерно половина их была заказана промышленными компаниями, а остальные были разработаны либо смешанными коллективами, либо университетскими, то есть были выполнены

коллективами, субъективно заинтересованными в исследовательской работе, но не в индустриальном использовании.

Важным показателем тенденций исследований и разработок этого периода в области МАС-технологий является активное использование методологий и инструментальных средств разработки — в 72% случаев авторы разработок использовали ту или иную методологию и/или программный инструментарий, как правило, ту, которая ими же и разрабатывалась. Это косвенно отражает тот факт, что МАС-приложения в этот период разрабатывались главным образом для тестирования методологий и инструментальных программных систем, но не для индустриальных приложений.

Интересно отметить, что прогноз по типам приложений, которые по мнению авторов документа [3], к 2015 г. будут представлять наибольший интерес, в целом оправдался. Как и предсказывалось, лидером в области использования МАС-приложений индустриального уровня были и остаются в настоящее время транспортная и производственная логистика (9 разработанных приложений), телекоммуникации (9 приложений), электронная коммерция (4), аэрокосмические (4) и военные приложения (3), энергетика (2) и управление бизнес-процессами (2). Неожиданными аутсайдерами в этом аспекте оказались системы в области здравоохранения (2), робототехники (2), в финансовой сфере (0), в области административного управления (0), и в ряде других классов приложений, которым в [6] предсказывались гораздо лучшие перспективы.

Из конкретных данных, приведенных в данном разделе по результатам анализа литературы, можно сделать следующие выводы:

1. МАС-технологии развиваются гораздо сложнее, медленнее и труднее, чем это хотелось бы научному сообществу, и тем более, чем это необходимо индустриальному сообществу. Немало способствует этому и сложившаяся система финансирования научных грантов в Европе, которая требует от исследователей не «стоять» долго в области конкретных технологий, но развивать новые направления и решать конкретные прикладные задачи общеевропейского масштаба.

2. Основные исследования и разработки ведутся в основном в научном сообществе. Индустриальные компании, которые на начальном этапе были, по сути, инициаторами МАС-разработок и ранее играли ведущую роль в стимулировании и финансировании разработок в области МАС, в настоящее время фактически полностью ушли от поддержки этих разработок (Motorola, Siemens и др.). Некоторые компании, например, IBM, Daimler, NASA, Google активно используют концепцию агентов как часть своих разработок, но не называют их агентскими и не акцентируют внимание на агентских

компонентах своих разработок. Ряд компаний (British Telecom, например) снизил объемы агентских разработок [7].

3. Интерес индустриального сообщества к использованию МАС и МАС-технологий к настоящему времени просто упал. При этом наблюдается высокая скрытая турбулентность, перегруппировка и перестройка зарождающегося рынка интеллектуальных информационных систем и технологий. На этом рынке МАС и МАС-технологии реально имеют много конкурентов, и эти конкуренты активно предлагают свои решения для приложений, которые изначально относились к компетенции МАС, вытесняя тем самым последних с этого рынка.

Очевидно, что в настоящее время МАС и технологии во многом проигрывают своим конкурентам на рынке интеллектуальных информационных технологий индустриального уровня. Но, с другой стороны, очевидно также и то, что в последние годы постоянно расширяется *число новых ниш и новых классов приложений*, в которых имеются большие перспективы для технологии агентов и МАС. Поэтому очень важно выяснить причины, которые в настоящее время тормозят практическое использование огромного потенциала, которыми МАС и МАС-технологии, бесспорно, обладают. Это вопрос рассматривается в следующем разделе.

**3. Что мешает практическому использованию огромного потенциала МАС?** Наверное, самое ценное, что в настоящее время реально предложила теория и практика МАС, это концептуализация сложных систем и задач. Именно естественная и понятная концептуализация модели и архитектуры программной реализации систем практически любой сложности привлекает внимание и исследователей, и разработчиков приложений. Если проанализировать литературу по МАС-приложениям, а также тематику докладов на ведущих конференциях по этой тематике, то можно видеть, что подавляющая часть их посвящена концептуальным моделям приложений и архитектур их программной реализации. Следует заметить, что эта тенденция наблюдается и в настоящее время, хотя и не так очевидно, как это было примерно до 2010 г. И это естественно, поскольку на этом этапе разработки приложений парадигма МАС предлагает понятный и привлекательный вариант проектирования.

Однако уже на следующем этапе, когда на базе концептуальной модели нужно построить формальную модель агента, создать архитектуру инфраструктуры, поддерживающей взаимодействие агентов, и описать язык общения агентов, все оказывается, мягко говоря, не так просто, и причины этого нельзя назвать субъективными. Сложность шага формализации модели и архитектуры МАС многократно возрастает.

тает. Решения, которые были предложены для этого этапа специалистами в области формальных моделей, по большей части отторгаются теми, кто заинтересован в их практическом использовании.

Рассмотрим основные причины такого положения дел с индустриальными приложениями МАС-технологий.

1. Отсутствие общепринятого понимания ключевых понятий МАС. На это, например, указано в работе [9]. Отсутствие четких определений и соглашений по основным понятиям в области МАС сильно затрудняет взаимопонимание между исследователями и разработчиками. Например, большинство профессионалов в области компьютерных технологий согласны с определениями основных концепций ООП, такими как классы, объекты, наследование, инкапсуляция. Они легко оперируют этими понятиями на практике. В то же время специалисты в области МАС имеют различное понимание таких базовых понятий, как агент, роль, переговоры, план, возможность и другие. Реальная проблема в области МАС состоит в том, что необходимо уточнить содержание этих базовых понятий и согласовать их взаимоотношения со сходными концепциями ООП, которые используются для программирования агентов и МАС. Возможно, одним из путей преодоления данной проблемы является разработка базовых онтологий для предметно-независимых понятий, используемых в МАС. Один из примеров онтологии предметно-независимых поведенческих понятий BDI-модели агента и МАС можно найти в работе [17].

2. Отсутствие общепринятой нотации для представления моделей МАС и их компонент. Поскольку еще не существует общепринятых определений базовых агентских понятий и их взаимосвязей [9], то отсутствие общей нотации для их описания и описания отношений на их множестве затрудняет исследование различных моделей МАС на практике. Стандартизация моделей и способов их представления необходимы, иначе трудно сравнивать различные подходы, модели и архитектуры МАС, что может привести к неадекватным оценкам новых подходов в области МАС-технологий.

3. Концептуальная и вычислительная сложность логической формализации BDI-модели агента и МАС на основе этой модели. Почти три десятилетия основные усилия исследователей в области теории МАС направлены на разработку моделей *интеллектуальных агентов*. Уже в самом начале этих исследований был сформулирован ряд свойств, которыми должен обладать агент. Как правило, каждый отдельный агент рассматривался как интеллектуальная сущность с собственной развитой базой знаний или по крайней мере моделью знаний, средствами целеполагания и механизмами планирования целенаправленного поведения в непредсказуемой внешней среде. Эта точка

зрения достаточно активно пропагандируется в течение многих лет. Можно сказать, что специалисты в области описания формальных моделей «соревновались» в том, чтобы обеспечивать агента все новыми и новыми интеллектуальными возможностями в части автономного поведения вплоть до способности определять намерения других агентов. Естественно, что простыми средствами такие интеллектуальные возможности агента описать и реализовать непросто, что привело к постоянному усложнению формальной модели агента и МАС.

С самого начала в качестве базовой формальной модели интеллектуального агента была выбрана *BDI*-модель (*BDI* от англ. *Belief – Desire – Intention, Убеждение – Желание – Намерение*) [18], в которой знания, убеждения, намерения и механизмы рассуждений агента описываются в терминах исчисления предикатов, расширенного модальными и темпоральными операторами.

Большинство исследователей в настоящее придерживаются понятий *BDI*-модели агента и МАС и их логической формализации. Важно отметить, что сама по себе *концептуальная основа BDI-модели* в терминах поведенческих и мотивационных понятий достаточно естественна и убедительна. Однако ее логическая формализация определенно сложна для понимания и является существенным барьером в интерпретации базовых понятий МАС [9], включая понимание самого термина *BDI*.

Если обратиться к истории развития искусственного интеллекта, то можно вспомнить, что в нем в течение достаточно долгого периода господствовали логические языки представления знаний и логический вывод в качестве механизма рассуждений. Можно увидеть подходящую аналогию этой истории с тем, что происходило и, к сожалению, все еще происходит в настоящее время в области теории агентов и МАС. Более того, слабые выразительные возможности исчисления предикатов первого порядка для описания моделей автономных агентов и их распределенного взаимодействия предлагается преодолевать за счет его обогащения модальными и темпоральными операторами. Именно эта модель и получила название *BDI*-модели.

Но, к сожалению, эта модель теоретически намного сложнее исчисления предикатов первого порядка, и надеяться на ее практически приемлемую эффективность в задачах индустриального уровня вряд ли следует. К тому же в модели *BDI*-агента взаимодействие агентов, в основном, имеет характер простых диалогов, а потому в ней нет средств для формализации сложных сценариев поведения агентов МАС. Эта задача возлагается на логические модели, с помощью которых агенты должны сами формировать модели других агентов и модель внешней среды для принятия решений. На практике это оказалось

невозможным. Следует заметить, что такой подход означает отказ от сути многоагентной парадигмы, которая формулируется как вычисления на основе взаимодействий и по сути есть шаг в самоорганизацию.

Итог активного продвижения логической формализация *BDI*-модели получился ожидаемым: как и логическая модель искусственного интеллекта, она породила много новых математических проблем и интересных задач в области неклассических логических исчислений, что сильно способствовало развитию соответствующих разделов математики. Но это совсем не способствовало созданию эффективных моделей и технологий в области МАС. Более того, это затормозило практическое использование МАС-технологий на десятилетия. В настоящее время имеется глубоко разработанная логическая теория *BDI*-модели агента, которая теоретически позволяет строить агентов высокого уровня интеллектуальности, способных к планированию целенаправленного поведения и автономному принятию решений, к распределенной координации поведения в достаточно сложных ситуациях. Но эти возможности отвечают уровню теорем существования в математике, так что при попытках практического использования логической модели *BDI*-агента уже для относительно простых приложений возникают серьезные проблемы вычислительной сложности. Убедительным примером подобной ситуации являются *BDI*-модели коллективного поведения роботов, которые активно финансировались DARPA в течение почти десятилетия. В конце 1990-х годов они рассматривались сообществом специалистов в области МАС как самые значительные достижения [19, 20]. Однако эти результаты могли быть продемонстрированы лишь авторами и лишь на очень простых примерах. С начала 2000-х годов информация о дальнейшем развитии этих проектов отсутствует в литературе, и они оба, возможно, просто закрыты. Можно сказать, что концептуально понятную и естественную модель коллективного поведения агентов в автономной миссии погубила логическая модель *BDI*-агентов и их взаимодействия.

Заметим, что в это время, хотя и на вторых ролях, развивались и другие модели агентов и МАС. И именно эти модели главным образом были использованы в большей части тех приложений, которые рассматриваются как успешные в [7, 16] и других работах.

4. Стандарты FIPA. Вопрос о стандартах в технологии МАС стал темой исследований еще в середине 1990-х годов, когда была создана общественная организация FIPA, предназначенная для научного обоснования стандартов МАС-технологий. Но FIPA была создана тем же научным сообществом, которое продвигало в практику логическую

модель *BDI*-агента и *MAC*, поэтому эта же модель рассматривалась *FIPA* в качестве базовой модели *MAC* и при разработке стандартов.

Например, стандартный язык коммуникации агентов *ACL* (от англ. *Agent Communication Language*) [21] для описания содержания сообщений, которыми обмениваются агенты, использует весьма сложный язык. В основе своей это тоже логический язык, который начали разрабатывать еще в 1970-е годы, когда он позиционировался как язык представления знаний в системах искусственного интеллекта с исчислением предикатов в своей основе. Современная его версия, получившая название *ACL*, представляет собой достаточно мощный и выразительный язык интерпретирующего типа, который манипулирует понятиями онтологии и способен представлять содержание сообщений, которыми обмениваются агенты, на языке, близком к естественному языку. Но он привносит в стандарт все черты логической модели *BDI*-агента со всеми вытекающими отсюда последствиями из-за проблем вычислительной сложности и большой загрузки каналов связи. С другой стороны, он труден для понимания и использования разработчиками приложений, а свобода, которую язык *ACL* вроде бы предоставляет разработчикам в модификации компонент синтаксической оболочки этого языка (так называемых перформативов), используется главным образом в исследовательском сообществе специалистов.

На практике же в большинстве случаев оказывается возможным обойтись значительно более простыми специализированными языками. Примером специализированного языка является язык обмена сообщениями, принятый в сервере *RoboCup* [22]. Он использует только необходимые и достаточные средства общения агентов и поэтому весьма эффективен. Например, для двух команд симуляционного футбола по 11 агентов каждая достаточно обычного персонального компьютера выпуска 2004 года, чтобы реализовать интенсивный обмен сообщениями между агентами команд в режиме реального времени. Совсем другой, более простой и прагматичный язык используется в модели *MAC*, предложенной сначала в инструментах компании *Magenta*, а затем развитый (теми же разработчиками) в инструментах Группы компаний *Генезис знаний* и *НПК Разумные решения* [23], где для представления текущих знаний активно используется понятие *сцены (модели ситуации)* как хранилища сведений о сети потребностей и возможностей (*ПВ-сети*) в окружающем мире.

Иная модель обмена сообщениями по сравнению со стандартом *FIPA* используется также в программном инструментарии *Cougaar* [24], который разработан в США по проекту *DARPA* для его использования в военных приложениях. В нем обмен сообщениями поддерживается стандартной архитектурой доски объявлений, на которой агенты пред-



лагают свои сервисы (доступные другим агентам как подключаемые модули) и ищут необходимые им сервисы по мере необходимости. При этом доска объявлений заметно расширяет множество доступных сервисов за счет веб-сервисов и *UDDI*-протокола [25]. Эта возможность реализуется специальной компонентой доски объявлений, которая называется *сервлет*. Она поддерживает коммуникации с объектами Интернет по *http*-протоколу, причем этот сервис доступен для использования всем подключаемым модулям узла.

Важно подчеркнуть, что модели агентов и МАС, предложенные в инструментах компании *Magenta* и *Cougaar*, оказались наиболее успешными в части индустриальных разработок, хотя они и не используют стандартную платформу FIPA.

К большому недостатку FIPA-стандартов следует отнести также и то, что спецификации FIPA вообще не рассматривают проблемы *параллельного программирования*, хотя МАС — это концепция, изначально ориентированная на параллельные вычисления.

5. Отсутствие гибких промышленных методов и технологий для разработки МАС-приложений. В работе [9] отмечается, что разработчики промышленных многоагентных систем сталкиваются с множеством агентских методологий и в большинстве случаев — с отсутствием программных инструментов их поддержки. Это, возможно, связано с тем, что новые методологии являются недостаточно гибкими для распространения на широкие области применений. В большинстве инструментов агенты служат только для дополнительной переупаковки объектов при помощи ООП, что дает некоторые преимущества, но значительно снижает возможности агентского подхода. Поэтому насущной задачей является интеграция существующих методологий разработки и инструментов их поддержки в единую хорошо определенную технологию [26].

Одной из причин негативных тенденций в области промышленного использования многоагентных технологий является не лучшая стратегия в области методологий и средств разработки МАС. С самого начала исследователи в области МАС придавали большое значение созданию методологий проектирования и программной реализации МАС, причем в период 2005-2010 гг. эти исследования и разработки велись наиболее активно. В этот период общее мнение сводилось к тому, что хорошая методология разработки и мощный инструментарий разработки позволят в значительной степени автоматизировать создание МАС-приложений промышленного уровня, и тогда их создание можно будет поставить на поток.

В период до 2010 г. было разработано более десятка методологий проектирования и разработки МАС, если не считать большого количества других менее значимых методов и методологий. К числу наиболее перспективных и глубоко проработанных методологий следует отнести такие методологии как *Gaia* [10], *Tropos* [11], *MaSE* [12], *ADELFE* [13], *MESSAGE* [14], *Prometheus* [15], *SADDE* [27] и ряд других. Большинство этих методологий сопровождалось также созданием инструментальных программных средств их поддержки (например, [28]). Эти средства использовали либо авторскую методологию разработки, либо одну из списка, приведенного выше. Например, к этому времени были разработаны такие средства как *agentTool* [29], *Zeus* [30], *agentBuilder* [31], *PASSI* [32], *MASDK* [33] и ряд других.

Все эти инструменты для своей разработки потребовали длительных усилий больших коллективов высокопрофессиональных исследователей, разработчиков, программистов и тестеров. Обычно на разработку и тестирование методологии и поддерживающего ее программного инструментария уходило не менее 10 лет.

Как правило, передовые методологии этого периода использовали концепцию разработки, управляемую моделью (англ. *model-driven engineering*). В методологиях такого типа концептуальная модель прикладной МАС, формальные модели ее стандартных компонент (модели агентов, онтологии, протоколов, сообщений и пр.), а также модели взаимодействия компонент и архитектура целевого программного продукта описывались на некотором формальном языке, при этом предпочтение отдавалось графическим языкам.

Такой формальный язык должен был автоматически поддерживать непротиворечивость моделей компонент системы разного уровня абстракции и генерацию протоколов взаимодействия агентов системы. Предполагалось, что формальная модель приложения, построенная таким способом, далее будет компилироваться в код программы на языке высокого уровня (например, в код *C++*, *Java* или в код другого языка аналогичного уровня). После этого система должна быть дополнена компонентами, для которых код может быть написан только вручную (это касалось «не агентских» компонент). Предполагалось, что полученный таким способом высокоуровневый код должен был далее компилироваться в исполняемый код.

Не трудно видеть, что инструментальная поддержка подобной методологии проектирования и программной реализации МАС-приложений является объективно «тяжелой», особенно в тех случаях, когда использовалась логическая модель *BDI*-агента и МАС. Как правило, методологии и инструментальные средства опирались на стандарты *FIPA*. По этой, а также по ряду других причин добиться желаемой эф-

фektivности методологии разработки и программной реализации приложения, так же, как и вычислительной эффективности целевого приложения, не удавалось. В итоге такой методологической и инструментальной подход, за некоторыми редкими исключениями, себя не оправдал. Только отдельные программные прототипы удавалось с его помощью довести до экспериментальных образцов. Некоторым исключением является инструментальный Living Systems® Technology Suite компании Whitestein Technology [34], который, однако, не использовался для массовой разработки МАС из-за трудоемкости, а что-либо про его коммерческую эффективность неизвестно.

Описанная стратегия разработки прикладных МАС активно пропагандировалась и практически использовалась в период 2005-2015+ гг. В литературе можно найти сведения о нескольких сотнях МАС-приложений, разработанных в этот период в различных прикладных областях. Но среди этих разработок большинство не получило последующего развития и применения, и их разработка была прекращена.

Та же судьба постигла и большинство методологий и поддерживающих их инструментальных программных средств: разработка и поддержка большей части из них в настоящее время прекращена.

6. Позиционирование МАС и МАС-технологий в прикладных областях. Как уже отмечалось, существует много классов приложений, которые ранее позиционировались как приложения, для создания которых архитектура и технология МАС являются наиболее перспективными. Однако практика показала, что многие из них уже давно имеют удачную программную реализацию индустриального уровня с помощью других технологий, в то время как их многоагентные реализации либо явно проигрывают таким реализациям, если они имеются, либо эти приложения к настоящему времени вообще не имеют агентской реализации. Причиной такой ситуации является то, что с самого начала МАС рассматривалась как достаточно универсальная ИТ-парадигма и технология, однако практика показала, что это не так, и было бы весьма полезно все-таки очертить область приложений МАС, а не уповать на универсальность этой парадигмы.

К настоящему времени область применений МАС и технологий, в которых они имеют неоспоримые преимущества, фактически не определена и еще только складывается. Перечисление классов потенциальных приложений в [6] базировалось в основном на слишком широком классе приложений и потому прогноз, данный в этой работе, не подтвердился. В этом документе, скорее, перечисляются те прикладные области, в которых агентские технологии могут быть использованы наряду с другими технологиями. В результате более зрелые технологии оказались в большей части случаев более успешными, что способствовало утверждению

негативных мнений о МАС-технологиях и снижению интереса индустриального сообщества к их использованию.

Можно утверждать, что для МАС-технологий пришла пора извлекать уроки и сузить возможный спектр применений. Практика уже сейчас формулирует много новых классов приложений, в которых для МАС-технологий альтернативы просто не просматривается. Примером являются задачи адаптивного управления ресурсами для приложений класса Интернета вещей и другие задачи современной цифровой экономики реального времени, извлечения знаний из больших неструктурированных данных и так далее.

7. Недостаточная зрелость математических моделей и методов самоорганизации для использования в сложных объектах сетевой структуры. Одной из важных причин затруднений, часто возникающих у разработчиков МАС, является отсутствие достаточно изученных адекватных математических моделей, методов и алгоритмов самоорганизации агентов, пригодных для недетерминированного решения сложных задач. Такие модели самоорганизации начали активно изучаться в научном сообществе лишь в самое последнее время, доказательством чему может служить рост числа докладов, посвященных принятию решений на основе консенсуса, на Международном конгрессе IFAC по автоматическому управлению [36].

На различных конференциях и практических семинарах очень часто разработчикам МАС задают такие вопросы, как:

– Какое качество результата может быть обеспечено при решении задач методами самоорганизации по сравнению с обычным комбинаторным подходом к оптимизации?

– Как в таких системах можно гарантировать эффективность функционирования системы?

– Что можно сказать о скорости сходимости процессов самоорганизации и устойчивости результата?

– Как быстро деградирует скорость решения задачи (вычислительная эффективность) с ростом размерности задачи?

И так далее.

Ответить на эти вопросы пока не всегда возможно, и часто «хороший результат» обосновывается лишь экспериментально. Но уже появились первые работы математиков, начавших активно изучать модели самоорганизации в различных приложениях [37], доказывающие, хотя пока и для относительно простых примеров, квазилинейность скорости поиска в МАС решений, близких к оптимальным. Кроме того, показана связь моделей построения самоорганизующихся расписаний с теорией сложных адаптивных систем и моделями нелинейной термодинамики, когда в МАС формируются «устойчивые неравновесия» и наблюдаются

близкие к «автокаталитическим» цепочки изменений [38]. При этом на практике уже в ряде случаев показано, что самоорганизующиеся МАС-приложения способны решать более сложные задачи по сравнению с другими методами, и, что еще важнее, в реальном времени.

В этой связи, можно привести много примеров различных прикладных задач из разных областей, в которых МАС-технологии являются единственным приемлемым вариантом на множестве всех существующих технологий. К ним относятся, например, крупномасштабные задачи управления объектами сетевой структуры, при решении которых классические модели, методы и средства оптимизации быстро «захлебываются» в переборе вариантов, а МАС-технологии оказываются способными в любом случае строить хотя бы допустимые решения. Имеются убедительные разработки, которые доказывают это [39, 40].

**4. Перспективы развития МАС-технологий в industriальных приложениях.** Несмотря на описанные негативные аспекты истории развития теории и технологии МАС, она вполне укладывается в классическую схему зарождения и выхода новой технологии из лабораторий в область промышленных применений, а этот процесс на практике никогда не бывает линейным (рисунок 1). В начале своего развития в 1990-е годы МАС стали вызовом в программировании и потребовали больших усилий выдающихся ученых и программистов для первых успешных разработок — вспомним синие экраны Norton Commander в DOS и первые Интернет-модемы того времени. Естественно, что не все решения оказались удачными.

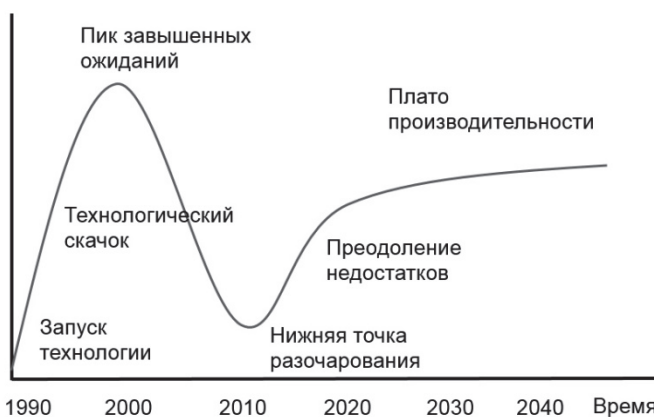


Рис. 1. Перспективы развития МАС и МАС-технологий в контексте стандартного цикла развития новых технологий

Несложно предсказать, что процесс развития такой революционной по своей сути технологии, как МАС-технология, будет и далее весьма нелинейным, что потребуются еще неоднократные попытки его трансформации и не все они будут успешными, прежде чем удастся сделать МАС-технологию действительно продуктивной и коммерческой.

Как отмечено в [23, 41, 42], разработчиков МАС подстерегают серьезные проблемы организационного, коммерческого и тому подобного характера из-за конкуренции на рынке ИТ. В качестве примеров можно привести такие проблемы:

- разработки МАС в сфере управления обычно вторгаются в самую «запретную» область принятия решений, критическую для бизнеса, где существует уверенность, что там «все уже занято», хотя часто в наличии имеются только учетные системы, или в нем процессы принятия решений совершенно не формализованы;

- процесс поиска решений в МАС является распределенным и недетерминированным, причем со значительным акцентом на самоорганизацию, что на практике противоречит традициям иерархического управления и, что еще важнее, традициям проектирования систем по принципу «сверху–вниз», поскольку самоорганизующиеся системы разрабатываются только по принципу «снизу–вверх» [43], но далее решение можно гармонизировать сверху, наблюдая формирующееся «целое», что предполагает создание в будущем класса гибридных моделей, в которых начальное решение ищется обычными методами, а далее модифицируется по событиям в МАС;

- продажа инновационных разработок МАС требует глубокого участия предметных специалистов, а не только разработчиков, и занимает много времени (от 3 до 24 месяцев);

- разработка МАС приложений, важных для бизнеса (по опыту крупных проектов), требует затрат сил и времени примерно в 3-5 раза больше, чем ожидается вначале;

- объем разработки многоагентной системы управления («движка») занимает не более 25% общего времени, в то время как все остальное время тратится на другие вопросы, связанные с учетом, базами данных, интерфейсом пользователя, интеграцией и так далее;

- разработка первой версии многоагентной системы наиболее трудоемка и занимает от 3 до 6 месяцев (минимум) даже при наличии опыта использования МАС-технологии;

- внедрение МАС часто занимает больше времени, чем сама разработка, поскольку требует выявления и отработки правил принятия и согласования решений, а также ее интеграции с уже существующими

щими информационными системами заказчика. Примерное соотношение затрат труда (в %) по основным фазам проекта МАС разработки: проектирование — 10, разработка — 20, тестирование — 15, поставка, внедрение и обучение — 35, поддержка — 20;

– разработанная система должна «выживать» в условиях постоянных ошибок пользователей, наличия неполных данных для проектирования, поступления неточных данных и так далее;

– пользователи должны иметь возможность вручную дорабатывать решения, поскольку всегда остаются факторы, которые не представляется возможным учесть при автоматическом принятии решений в системе и тому подобное.

Преодоление негативных тенденций в области практического использования МАС, безусловно, потребует значительных усилий, но в случае успеха результаты окупят все вложения, обеспечивая на практике большие преимущества МАС-технологий. По существу, в настоящее время идет активная работа над ошибками МАС-технологий и преодоление недостатков.

Вместе с тем полноценный выход МАС на плато продуктивности на уровне отраслевых стандартов, по-видимому, можно ожидать не ранее 2020-2025 гг., причем в числе наиболее перспективных областей использования МАС-технологий следует ожидать:

– *Аэрокосмическая отрасль* — коллективное самоорганизующееся поведение беспилотных космических и летательных аппаратов, управление группировками малых спутников, тренажеры для летчиков и авиадиспетчеров, космическая логистика и др.

– *B2B сети производственных и транспортных предприятий*, стратегическое планирование и оперативное управление производством, сетевая логистика (транспортная и др.), где уже используются агентские решения и технологии, но еще остается большое поле для использования сетевых МАС-технологий [39].

– *Военные приложения* — имеется много косвенных признаков и свидетельств активности индустриальных разработок в этой области за рубежом, однако эта информация закрыта.

– *Коллективная робототехника, автономные миссии роботов* — пока находится в стадии изучения возможностей, однако специалистами всего мира рассматривается как одна из самых перспективных областей для многоагентных приложений.

– *Смарт-грид, виртуальные электростанции* и другие приложения в области энергетики. Эти разработки уже начаты 4-5 лет тому назад, и наблюдается рост их активности с использованием МАС-технологий.

– *Здравоохранение* — решения в области окружающей среды для поддержки здоровья населения (англ. *ambient assisted living, personal healthcare* и др.).

– *Задачи в области Интернета вещей*, где нужно разрабатывать распределенные системы обеспечения безопасности, сенсорные сети, интеллектуальные пространства и тому подобное [35, 44, 45].

– *Мобильные приложения* — по оценкам компании Gartner до 40% будущих мобильных приложений в течение ближайших 10 лет будут построены на основе MAC-технологий.

– Виртуальные (оверлейные) сети и *peer-to-peer* (p2p) — приложения (англ. *Software-Defined Networking*) — эта парадигма взаимодействия распределенных приложений сейчас очень востребована.

Но уже и в настоящее время имеются MAC-приложения, которые демонстрируют свои преимущества на практике. Приведем два примера приложений, разработанных с помощью авторских MAC-технологий, которые лишены ряда недостатков, отмеченных в разделе 3 как главные причины неудач MAC-технологий в индустрии ИТ.

1. Самоорганизующиеся В2В-сети предприятий [39]. В2В-сетями называют вид экономического и информационного взаимодействия множества предприятий, имеющий целью координацию планирования и исполнения распределенных бизнес-процессов *в интересах самого бизнеса*. Узлами сети являются предприятия, которые на долгосрочной основе кооперируются в выполнении потока заказов, поступающих в произвольные узлы сети в режиме реального времени. Полагается, что В2В-сеть является открытой, то есть к ней могут присоединяться новые узлы, они также могут выходить из сети и возвращаться в нее снова. Эта сеть является p2p-сетью, в которой как коммуникации, так и содержательные взаимодействия поддерживаются с помощью p2p-протоколов.

В общем случае полагается, что заказы могут поступать в сеть через произвольные ее узлы в режиме реального времени. Заказ может состоять из сложно структурированного множества подзаказов, которые по тем или иным причинам не могут быть выполнены одним узлом сети. Причины могут быть технологическими (предприятие не имеет возможности выполнить все компоненты заказа), ресурсными (предприятие перегружено заказами и может выделить на новый заказ лишь ограниченные ресурсы), или экономическими (распределенный процесс выполняется специализированными предприятиями, что обходится дешевле) и другое [39]. Далее рассматривается MAC-архитектура и технология решения задачи координации расписаний



распределенного выполнения заказов в режиме реального времени, одной из наиболее сложных задач, решаемых в B2B-сетях.

MAC-архитектура узла B2B-сети представлена на рисунке 2. Алгоритм распределенной координации локальных расписаний узлов B2B-сети строится на основе обмена метаданными между ее узлами, представленными в системе составления расписания агентами трех типов:

– *Агент узла Department Agent, DA*, представляющий в сети некоторое предприятие — он ответственен за составления локальных расписаний узла и за взаимодействие с *DA*-агентами других узлов при распределенной координации расписаний на метауровне.

– *Агент ресурса Resource Agent, RA*, — участвует в выполнении *Протокола контрактных сетей* при составлении локального расписания.

– *Локальный агент заказа Local Order Agent, LOA* — участвует в составлении локального расписания узла, отвечая за соблюдение технологии выполнения локальной части заказа.

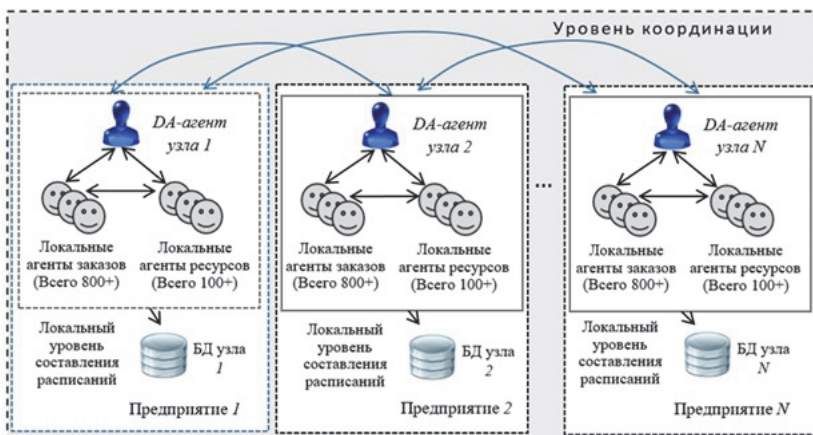


Рис. 2. Архитектура MAC распределенного составления расписаний выполнения взаимосвязанных заказов в производственной B2B-сети

Детали взаимодействия этих агентов при составлении *локального* расписания описаны в [46].

В системе имеется также еще один агент, называемый Агентом заказа *Order Agent, OA*, который является агентом метауровня. Он владеет информацией о заказе в целом, например о самом раннем допустимом времени начала исполнения заказа и о самом позднем допустимом времени его завершения. В этой архитектуре информация о ресурсах и технологиях узлов доступна только агентам соответствующих узлов, что решает задачу конфиденциальности. Важно отметить,

что задача координации локальных расписаний решается на основе взаимодействия *DA*-агентов узлов, а также их взаимодействия с мета-агентами *OA*. Протокол их взаимодействия описан в [46]. Поддержка этого взаимодействия выполняется с помощью распределенной программно-коммуникационной платформы, которая реализует традиционные сервисы платформы, минимальный набор которых включает в себя сервисы белых и желтых страниц, а также сервис адресации сообщений на основе того или иного р2р-протокола [47].

Однако архитектура и реализация этой платформы (среды исполнения агентов и среды их взаимодействия) значительно отличается от той, которая диктуется стандартами FIPA. В этой архитектуре средой исполнения всех агентов является *Akka System*, которая играет роль *локальной* компоненты р2р-платформы агентов. Она реализует функции управления потоками, диспетчеризацию сообщений, управляет жизненным циклом агентов [48], является каркасом для дополнительных модулей системы и отвечает за ряд других важных задач. Все узлы сети разделяют общую онтологию *Ontology*, то есть одну модель данных.

Эффективная реализация рассматриваемой системы [47] с помощью MAC-архитектуры и технологии стала возможной благодаря тому, что в ней используется простая модель агента, в основе которой лежит понятие *актора* [48], которая намного проще *BDI*-модели. В этой реализации взаимодействие распределенных компонент поддерживается нестандартной агентской платформой, которая намного «легче», чем распределенная р2р агентская платформа, предусматриваемая стандартом FIPA. Технология *Akka* предлагает хорошую модель организации параллельных\распределенных вычислений, основанную на модели акторов, которая избавляет разработчиков от ряда острых проблем, не решенных в классических FIPA-платформах, таких как *JADE* [49]. Взаимодействие агентов основано на передаче простых событий, а не сложных *ACL*-сообщений, что также повышает вычислительную эффективность MAC-реализации рассматриваемого весьма сложного приложения, сохраняя при этом все концептуальные преимущества парадигмы MAC.

2. Адаптивное управление мобильными бригадами. Рассмотрим задачу управления крупной региональной сетью аварийно-ремонтных бригад. Организационно система управления включает в себя центр приема заявок от населения по телефону (далее для краткости «*колл-центр*» от англ. *call center*), центральную диспетчерскую и специально оснащенные мобильные бригады техников по ремонту и обслуживанию объектов в сетях газоснабжения, водоснабжения, водоотведения, телекоммуникации и других в районе с сотнями тысяч жителей.

Заявки от населения («аварийные заявки») характеризуются срочностью устранения аварии (средняя, важная и критическая), местом проведения работ и видом работ. Помимо заявок от населения на устранение аварий, существуют также планово-профилактические работы, которые проводятся этой же службой бригад согласно утвержденному ежемесячному графику. Для более сложных работ требуются специалисты более высокой квалификации. Для некоторых видов работ требуется наличие у бригады дополнительного оборудования, например сварочного аппарата. Каждая бригада имеет в распоряжении специальный автомобиль для выездов по заявкам, оснащенный необходимым оборудованием. В любой момент времени местоположение бригады определяется датчиком GPS/ГЛОНАСС-навигации специального автомобиля бригады. Каждый бригадир имеет мобильный терминал, через который он «видит» план выполнения заявок, назначенных на его бригаду, и может делать фактические отметки о выезде, о начале и об окончании работ по каждой заявке. Аварийные заявки имеют горизонт планирования на текущий день, плановые — в течение месяца. Невыполненные заявки текущего дня переносятся на следующий день.

Содержание задачи управления мобильными бригадами состоит в следующем:

1) Автоматически распределить и выполнить открытый пул заявок текущего дня наискорейшим образом в порядке срочности их выполнения и в соответствии с их приоритетами — *критическая, важная, средняя* или *плановая* заявка. Задача планирования работ имеет достаточно высокую сложность ввиду большого числа ежедневных заявок и ограниченным количеством бригад. Например, в Средневожской газовой компании (г. Самара) обычно бывает порядка 50 заявок в день при наличии 25 бригад, а в Водоканале г. Волгограда — порядка 64 заявок при том, что общее количество бригад равно 15. При этом большую роль играет фактор времени.

2) Дополнительно нужно оперативно, гибко и эффективно реагировать на поток заявок (событий) реального времени, а именно на поступление более срочных заказов или на внезапную поломку одного из специальных автомобилей бригад в пути, что приводит к недоступности бригады. Например, при поступлении более срочной заявки нужно определить бригаду, которая сможет ее выполнить и прибыть на место раньше других с учетом других заявок своего плана, и при этом нужно также оперативно перестроить расписание работ этой бригады.

3) Управлять маршрутом движения бригады к месту работ с учетом текущей дорожной ситуации (дорожные знаки, разметка, пробки) с тем, чтобы сократить время движения.

4) Сократить простой квалифицированных и хорошо оснащенных бригад, которые должны гибко маневрировать расписанием, переходя от срочных заявок к профилактике и наоборот.

5) Обеспечить индивидуальный подход к каждой поступившей заявке и ресурсу, назначаемому для ее выполнения. За выполнение каждой заявки бригаде начисляется бонус в зависимости от сложности выполненных работ согласно регламенту сервисной службы, при этом основным показателем качества работы бригады является фактическое время ее выполнения и отсутствие повторных выездов на следующий день. Задача управления мобильными бригадами решается с помощью адаптивного МАС-планировщика, способного планировать задачи обслуживания в реальном времени с минимизацией пробега автотранспорта бригад, времени выполнения заявок на обслуживание и общее число невыполненных заявок клиентов в текущий день.

Архитектура разработанного МАС-планировщика включает в себя виртуальный мир программных агентов, которые могут обмениваться сообщениями для того, чтобы информировать о своих возможностях и параметрах состояния (о потребном времени на выполнение планируемой заявки, стоимости ее выполнения, о своих координатах и др.).

Сущность работы МАС-планировщика состоит в скрывающей адаптивной обработке сообщений о событиях, в ходе которой план гибко корректируется без остановов системы. При отсутствии внешних событий и нагрузки по выполнению аварийных заявок бригады выполняют плановые работы по поддержке/обслуживанию сетей предприятия. Архитектура системы представлена на рисунок 3.



Рис. 3. Логическая архитектура системы адаптивного управления аварийно-ремонтными бригадами

Основной оценкой состояния и возможности выполнения заявки является суммарное время поездки бригады до места выполнения заявки и время ее выполнения.

В отличие от сложных BDI-моделей агентов, в разработанном МАС-планировщике используются простые агенты с интенсивными переговорами. Сам планировщик представляет собой распределенную систему активно взаимодействующих агентов следующих типов:

– *Агент заявки*, ответственный за поиск наиболее подходящей специализированной бригады, способной выполнить работу как можно скорее и с нужным качеством.

– *Агент региона*, который помогает балансировать распределение машин между районами города с учетом прогноза поступления заявок.

– *Агент маршрутов перемещений*, чья цель состоит в том, чтобы предложить бригаде маршрут движения к месту аварии с минимальным временем в пути и таким образом способствовать увеличению числа заявок, выполняемых бригадами за смену.

– *Агент бригады*, целью которого является подбор и согласование заявок и маршрутов с целью повышения продуктивности работы бригады.

– *Агент предприятия*, стремящийся улучшить наиболее проблемные фрагменты расписания мобильных бригад компании.

Все решения по распределению и планированию работы бригад, которые формируются с помощью переговоров агентов по соответствующим протоколам и самоорганизации, предлагаются диспетчеру. Он может при необходимости интерактивно перестроить расписание любой бригады (рисунок 4). Типовой протокол взаимодействия агентов при поступлении заявки на аварийное обслуживание с описанием аварийной ситуации через интерфейс колл-центра описан в работе [26].

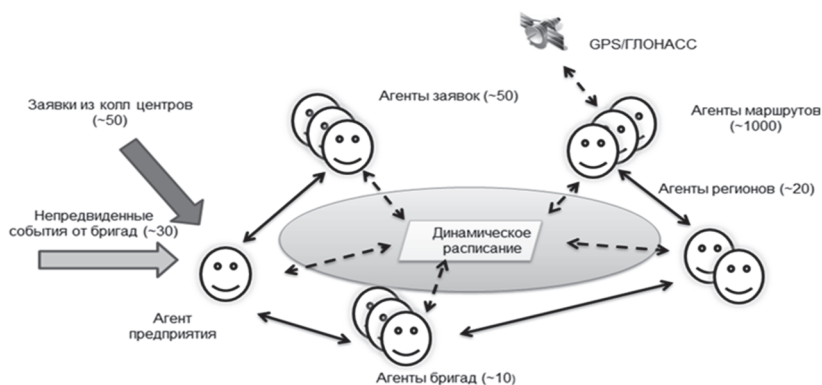


Рис. 4. Сцена мира агентов адаптивного управления аварийно-ремонтными бригадами (штрих линия — чтение из сцены и изменения в сцене, сплошная линия — обмен сообщениями и переговоры агентов)

В результате обмена сообщениями текущее расписание по событиям постоянно адаптивно подстраивается под новые заявки и динамику дорожной ситуации. Время, необходимое для оценки вариантов размещения заявки составляет обычно не больше 4 секунд.

Использование адаптивного планировщика для обработки поступающих заявок в реальном времени позволило достичь повышения продуктивности обслуживающих бригад на 40%, поскольку каждая бригада газовой службы в настоящее время выполняет в среднем 12 задач (ранее эта цифра была равна 7 задачам в день). В результате его внедрения в Средневожской газовой компании, которая уже несколько лет успешно эксплуатирует описанную систему, удалось добиться заметного улучшения различных показателей работы [26].

**5. Заключение.** В научном сообществе МАС-технологии уже долгое время рассматриваются как достаточно мощная интеллектуальная ИТ, способная успешно конкурировать с другими технологиями в широком классе приложений. Однако это мнение до настоящего времени пока не подтверждается реальными разработками. Более того, большое число классов приложений, для которых МАС-технология считалась приоритетной, к настоящему времени успешно реализованы другими более зрелыми технологиями. Это в определенной мере подорвало доверие к МАС-технологиям со стороны индустриального сообщества и, соответственно, интерес к финансированию разработок.

Большие негативные последствия для авторитета МАС-технологий обусловлены также недооценкой сложности разработки МАС-приложений, которая требует от разработчиков не только высокой алгоритмической квалификации и хороших навыков объектного программирования, но также и навыков программирования параллельных и асинхронных вычислений, привлечения моделей искусственного интеллекта и активного включения в процесс использования достижений в области телекоммуникаций и их дальнейшей разработки.

Серьезным внутренним препятствием для развития МАС стала ориентация базовой модели агента МАС на использование логического языка, дополненного модальными и темпоральными операторами для формального описания *BDI*-модели поведения агентов. Эта модель, весьма привлекательная из-за ее богатых выразительных возможностей и математической корректности, на практике оказалось непригодной для создания промышленных систем из-за вычислительной сложности и, соответственно, трудности создания и использования инструментальных программных средств поддержки технологии МАС и, как следствие, высокой стоимости реализации разработок. И хотя постоянно возрастает

множество потенциальных МАС-приложений, исследования в области теории и практики МАС проводятся практически без учета потребностей индустрии.

Тем не менее агентские модели и технологии по-прежнему остаются перспективными для большого количества новых и будущих приложений, в особенности для тех из них, которым свойственны такие черты, как множественность и автономность объектов приложения, сетевая структура их взаимодействия, высокая неопределенность среды функционирования и структурная динамика поведения, большой масштаб. Эффективное управление в таких системах может быть достигнуто только за счет использования принципов самоорганизации и распределенной координации.

Новые поколения таких систем строятся на основе концепций Интернета вещей и Интернета людей, в которых каждая «вещь» рано или поздно должна стать «умной», а пользователь — получить своего ассистента, помогающего решать проблемы реальной жизни в реальном времени. Любая вещь в этом подходе рано или поздно должна будет обладать не только датчиками и устройствами воздействия на объекты внешнего мира и коммуникации, но и принимать решения, причем по возможности согласованно с другими вещами. Эти требования, в свою очередь, порождают концепцию Интернета агентов как новой версии технологии многоагентных систем, способной реализовать на практике принципы самоорганизации и кооперации всех компонент сложной системы [35].

Для того чтобы эта технология стала продуктивной и способной обслуживать потребности новых промышленных приложений, необходима смена базовой парадигмы формализации модели агента и программно-коммуникационной инфраструктуры с тем, чтобы технология МАС стала по-настоящему эффективной и продуктивной, была способна обеспечить поддержание полного жизненного цикла агента, его взаимодействия с внешней средой и облачными сервисами. В новой парадигме формализации МАС-приложение рационально строить как множество простых агентов с богатой компонентой взаимодействия и с широким использованием принципов самоорганизации и эволюции, присущих живым системам — в конечном счете для создания цифровых экосистем (систем систем), построенных как конкурирующие и кооперирующиеся сервисы.

### **Литература**

1. Digital Ecosystems. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_ecosystem](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_ecosystem) (дата обращения: 04.11.2017).
2. Digital Business Ecosystems & The Platform Economy. URL: <http://www.gartner.com/technology/topics/business-ecosystems.jsp> (дата обращения: 04.11.2017).

3. <https://www.linkedin.com/pulse/industrial-upcycling-definition-michael-rada/> (дата обращения: 04.11.2017).
4. *Kaminka G.* Robots Are Agents, Too! // Keynote Lecture. International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS 2007). 2007. pp. 4.
5. The First International Workshop on the Internet of Agents (IoA). 2016. URL: <http://www2.cs.siu.edu/~salqithami/ia/> (дата обращения: 04.11.2017).
6. *Luck M., McBurney P., Shehory O., Willmott S.* Agent technology: computing as Interaction (a roadmap for agent based computing) // University of Southampton Department of Electronics & Computer Science. 2005. 108 p. URL: <http://www.agentlink.org/roadmap/> (дата обращения: 04.11.2017).
7. *Müller J., Fisher K.* Application Impact of Multi-agent Systems and Technologies: A Survey // Agent-oriented software engineering. 2014. pp. 27–53.
8. *Strassner J.* Using agents and autonomic computing to build next generation seamless mobility services // Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. 2007. Article no. 1.
9. *DeLoach S.A.* Moving multi-agent systems from research to practice // International Journal Agent-Oriented Software Engineering. 2009. vol. 3. no. 4. pp. 378–382.
10. *Zambonelli F., Jennings N., Wooldridge M.* Developing Multi-agent systems: The GAIA methodology // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2003. vol. 12(3). pp. 417–470.
11. *Brinkkemper J., Solvberg A.* Tropos: A framework for requirements-driven software development // Info. Syst. Engg.: State Art Res. Themes. 2000. LNCS 1. pp. 261–273.
12. *DeLoach S.* Analysis and Design using MaSE and agentTool // Proceedings of the 12<sup>th</sup> Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference (MAICS). Miami University Press. 2001.
13. *Bernon C., Gleizes M.P., Peyruqueou S., Picard G.* ADELFE: a methodology for adaptive multi-agent systems engineering // International Workshop on Engineering Societies in the Agents World. 2002. pp. 156–169.
14. *Caire G. et al.* Agent Oriented Analysis using MESSAGE/UML // International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering. 2001. pp. 119–135.
15. *Padgham L., Winikoff M.* Prometheus: A Paradigm Methodology for Engineering Intelligent Agents // Proceedings of the Workshop on Agent-Oriented Methodologies. 2002. pp. 97–108.
16. *Leitao P., Vrba P.* Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. 2011. LNCS 6867. pp. 15–28.
17. *Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В.* Базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и ее расширения // Известия РАН: Теория и системы управления. 2015. № 5. С. 102–121.
18. *Wooldridge M.* An Introduction to Multi-Agent Systems // John Wiley & Sons. 2009. 368 p.
19. *Tambe M.* Towards Flexible Teamwork // Journal of artificial intelligence research. 1997. vol. 7. pp. 83–124.
20. *Sycara K., Suktharak G.* Literature review of teamwork models // Robotics Institute, Carnegie Mellon University. 2006. 31 p. URL: [http://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub4/sycara\\_katia\\_2006\\_1/sycara\\_katia\\_2006\\_1.pdf](http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub4/sycara_katia_2006_1/sycara_katia_2006_1.pdf) (дата обращения: 04.11.2017).
21. ACL – Agent Communication Language. URL: <http://fipa.org/specs/fipa00061/SC00061G.pdf> (дата обращения: 04.11.2017).
22. RoboCup Soccer Server URL: <http://swarm.cs.virginia.edu/robocup/documentation/manual.pdf> (дата обращения: 04.11.2017).



23. *Виттик В.А., Скобелев П.О.* Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.
24. Cougaar Agent Architecture. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cougaar> (дата обращения: 04.11.2017).
25. Technology Reports, Universal Description, Discovery, and Integration (UDDI). URL: <http://xml.coverpages.org/uddi.html> (дата обращения: 04.11.2017).
26. *Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О. Майоров И.* Современное состояние и перспективы промышленных применений многоагентных систем // Управление большими системами. 2017. Вып. 66. С. 94–157.
27. *Sierra C., Sabater J., Augusti J., Garcia P.* SADDE: Social Agents Design Driven by Equations // Methodologies and software engineering for agent systems. Kluwer Academic Publishers. 2004. pp. 1–24.
28. *Luck M., Gomez-Sanz J.* Agent-oriented Software Engineering IX // 9th International Workshop (AOSE 2008). 2009. LNCS 5386. 287 p.
29. *Garcia-Ojeda J.C., DeLoach S.A.* AgentTool Process Editor: Supporting the Design of Tailored Agent-based Processes // Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing. 2009. pp. 707–714.
30. *Nwana H.S., Ndumu D.T., Lee L.C., Collis J.C.* ZEUS: A Toolkit for Building Distributed Multi-Agent Systems // Applied Artificial Intelligence. 1999. vol. 13. no. 1-2. pp. 129–185.
31. AgentBuilde – an integrated software toolkit that allows software developers to quickly develop intelligent software agents and agent-based applications. URL: <http://www.agentbuilder.com/Documentation/brochures/ABFamilyBrochure.pdf> (дата обращения: 04.11.2017).
32. *Burrafato P., Cossentino M.* Designing a multi-agent solution for a bookstore with PASSI methodology // Procs. Agent-Oriented Information Systems. 2002. pp. 119–135.
33. *Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Konushy V.* Support for Analysis, Design and Implementation Stages with MASDK // International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering. 2008. pp. 272–287.
34. *Rimassa G., Greenwood D., Kernland M.E.* The Living Systems Technology Suite: An Autonomous Middleware for Autonomic Computing // International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS'06). 2006. pp. 33–33.
35. *Gorodetsky V.* Internet of Agents: From Set of Autonomous Agents to Network Object // Second International Workshop on Internet of Agents. 2017. pp. 1–17.
36. International Federation of Automatic Control (IFAC). URL: <https://www.ifac-control.org/> (дата обращения: 04.11.2017).
37. *Granichin O., Volkovich Z., Toledano-Kitai D.* Randomized Algorithms in Automatic Control and Data Mining // Springer Series: Intelligent Systems Reference Library. 251 p. URL: <http://www.twirpx.com/file/1562616/> (дата обращения: 04.11.2017).
38. *Mayorov I., Skobelev P.* Toward Thermodynamics of Real Time Scheduling // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. 2015. vol. 10. no. 3 pp. 21–223.
39. *Городецкий В.И.* Многоагентная самоорганизация в B2B сетях // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. С. 8954–8965. URL: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/vspu2014.zip> (дата обращения: 04.11.2017).
40. *Rzhevski G., Skobelev P.* Managing complexity // WIT Press. 2014. 156 p.
41. *Скобелев П.О.* Мультиагентные технологии в промышленных приложениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 33–46.
42. *Скобелев П.О.* Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы

- развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». 2013. № 1. С. 1–32.
43. *Городецкий В.И.* Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 3. С. 102–123.
  44. *Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S.* Fog computing and its role in the internet of things // Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. 2012. pp. 13–16.
  45. *Yi Sh. et al.* Security and Privacy Issues of Fog Computing: A Survey // International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications. 2015. LNCS 9204. pp. 685–695.
  46. *Бухвалов О.Л. и др.* Распределенная координация в В2В производственных сетях // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 3. С. 193–203.
  47. *Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В.* Инструментальные средства для открытых сетей агентов // Известия РАН. Теория и Системы Управления. Москва. Наука. 2008. №. 3. С. 106–124.
  48. *Hewitt C., Bishop P., Steiger R.* A Universal Modular Actor Formalism for Artificial Intelligence // Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-1973). pp. 235–245.
  49. *Bellifemine F., Poggi A., Rimassa G.* JADE – A FIPA-compliant agent framework. JADE. URL: <http://jmvidal.cse.sc.edu/library/jade.pdf> (дата обращения: 04.11.2017).

**Городецкий Владимир Иванович** — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: прикладная статистика, планирование и составление расписаний, искусственный интеллект и принятие решений, многоагентные системы, инструментальные системы, интеллектуальная обработка данных и машинное обучение, системы с неопределенностью, рекомендующие системы, транспортная и производственная логистика, модели коллективного поведения роботов. Число научных публикаций — 300. [gor@iias.spb.su](mailto:gor@iias.spb.su), <http://space.iias.spb.su/ai/gorodetsky/>; 39, 14 линия В.О., Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)323-3570, Факс: +7(812)328-0685.

**Скобелев Петр Олегович** — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных систем, Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук (ИПУСС РАН), заведующий кафедрой электронных систем Самарский технический университет (СамГТУ), профессор, Самарский аэрокосмический университет, президент, Группа компаний «Генезис знаний», генеральный конструктор, Группа компаний «Генезис знаний». Область научных интересов: базы знаний и мультиагентные технологии, искусственный интеллект и принятие решений, распределение, планирование и оптимизация ресурсов в транспортной и производственной логистике, понимание текстов и извлечение знаний. Число научных публикаций — 250. [skobelev@kg.ru](mailto:skobelev@kg.ru), <http://www.kg.ru>; Московское шоссе, 17, офис 1202, Самара, 443017; р.т.: +7(846)279-37-79, Факс: +7(846)279-37-79.

**Поддержка исследований.** Результаты этой работы были получены в рамках исследований по бюджетной тематике СПИИРАН (проект № 0073-2015-0003) и по проекту Программы Президиума РАН 1.5, проект № 214, а также по гранту РФФИ «Теоретические основы эмерджентного интеллекта для решения сложных задач управления ресурсами» (проект № 16-01-00759)

V.I. GORODETSKY, P.O. SKOBELEV  
**INDUSTRIAL APPLICATIONS OF MULTI-AGENT  
 TECHNOLOGY: REALITY AND PERSPECTIVES**

*V.I. Gorodetsky, P.O. Skobelev. Industrial Applications of Multi-agent Technology: Reality and Perspectives.*

**Abstract.** Since early 1990<sup>th</sup>, multi-agent technology is evaluated as one of the most perspective design and implementation technologies for industrial scale distributed applications. However, the practice has falsified all the prognoses and expectations. The paper examines the current state-of-the-art in industrial use of the multi-agent technology. It analyzes external and internal reasons preventing broad practical use of the technology and formulates the lessons learnt through this examination. Finally, the paper outlines the basic issues to be revised in order to practically realize the great potential of the multi-agent technology. The paper also shows, by example, that multi-agent technology has currently no alternative for many novel most important applications including Internet of Things.

**Keywords:** multi-agent systems, industrial applications, multi-agent system roadmap, agent interactions, interaction protocol, Internet of Things.

**Gorodetsky Vladimir Ivanovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, chief researcher of intelligent systems laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: applied statistics, planning, artificial intelligence, multi-agent systems, knowledge discovery and data fusion, P2P agent-based systems and technologies, self-organized systems, distributed data mining and knowledge discovery. The number of publications — 300. gor@iias.spb.su, <http://space.iias.spb.su/ai/gorodetsky/>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)323-3570, Fax: +7(812)328-0685.

**Skobelev Petr Olegovich** — Ph.D., Dr. Sci., leading researcher of intelligent systems laboratory, Institute of Control of Complex Systems of Russian Academy of Science, head of electronic systems department, Samara State Technical University, professor, Samara State Aerospace University, president, Knowledge Genesis Group, chief developer, Knowledge Genesis Group. Research interests: knowledge bases and multi-agent technology, artificial intelligence and decision making, resource allocation, scheduling, optimization and control, text understanding and data mining. The number of publications — 250. skobelev@kg.ru, <http://www.kg.ru>; 17, Moscovskoe Shosse str., office 1202, Samara, 443013, Russia; office phone: +7(846)279-37-79, Fax: +7(846)279-37-79.

**Acknowledgements.** A part of the results were got as the results of the efforts according to the SPIIRAS Governmental Project № 0073-2015-0003 and the Project # 214 of the Program # 1.5 of the Russian Academy of Sciences, and RFFI grant "Theoretical Foundations of Emergent Intelligence for Solving Complex Problems of Management resources ", project #16-01-00759

## References

1. Digital Ecosystems. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_ecosystem](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_ecosystem) (accessed: 04.11.2017).
2. Digital Business Ecosystems & The Platform Economy. Available at: <http://www.gartner.com/technology/topics/business-ecosystems.jsp> (accessed: 04.11.2017).
3. <https://www.linkedin.com/pulse/industrial-upcycling-definition-michael-rada/> (accessed: 04.11.2017).

4. Kaminka G. Robots Are Agents, Too! Keynote Lecture. International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS 2007). 2007. pp. 4.
5. The First International Workshop on the Internet of Agents (IoA). 2016. URL: <http://www.2.cs.siu.edu/~salqithami/iaa/> (accessed: 04.11.2017).
6. Luck M., McBurney P., Shehory O., Willmott S. Agent technology: computing as Interaction (a roadmap for agent based computing). University of Southampton Department of Electronics & Computer Science. 2005. 108 p. Available at: <http://www.agentlink.org/roadmap/> (accessed: 04.11.2017).
7. Müller J., Fisher K. Application Impact of Multi-agent Systems and Technologies: A Survey. Agent-oriented software engineering. 2014. pp. 27–53.
8. Strassner J. Using agents and autonomic computing to build next generation seamless mobility services. Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. 2007. Article no. 1.
9. DeLoach S.A. Moving multi-agent systems from research to practice. *International Journal Agent-Oriented Software Engineering*. 2009. vol. 3. no. 4. pp. 378–382.
10. Zambonelli F., Jennings N., Wooldridge M. Developing Multi-agent systems: The GAIA methodology. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2003. vol. 12(3). pp. 417–470.
11. Brinkkemper J., Solvberg A. Tropos: A framework for requirements-driven software development. *Info. Syst. Engg.: State Art Res. Themes*. 2000. LNCS 1. pp. 261–273.
12. DeLoach S. Analysis and Design using MaSE and agentTool. Proceedings of the 12<sup>th</sup> Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference (MAICS). Miami University Press. 2001.
13. Bernon C., Gleizes M.P., Peyruqueou S., Picard G. ADELFE: a methodology for adaptive multi-agent systems engineering. International Workshop on Engineering Societies in the Agents World. 2002. pp. 156–169.
14. Caire G. et al. Agent Oriented Analysis using MESSAGE/UML. International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering. 2001. pp. 119–135.
15. Padgham L., Winikoff M. Prometheus: A Paradigm Methodology for Engineering Intelligent Agents. Proceedings of the Workshop on Agent-Oriented Methodologies. 2002. pp. 97–108.
16. Leitao P., Vrba P. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents. Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. 2011. LNCS 6867. pp. 15–28.
17. Gorodetsky V.I., Samoilo V.V. Trotskii D.V. [The Reference Ontology of Collective Behavior of Autonomous Agents and Its Extensions]. *Izvestija RAN: Teorija i sistemy upravlenija – Proceedings of the Russian Academy of Sciences: Theory and Control Systems*. 2015. vol. 5. pp. 102–121. (In Russ.).
18. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley & Sons. 2009. 368 p.
19. Tambe M. Towards Flexible Teamwork. *Journal of artificial intelligence research*. 1997. vol. 7. pp. 83–124.
20. Sycara K., Sukthankar G. Literature review of teamwork models. Robotics Institute, Carnegie Mellon University. 2006. 31 p. Available at: [http://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub4/sycara\\_katia\\_2006\\_1/sycara\\_katia\\_2006\\_1.pdf](http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub4/sycara_katia_2006_1/sycara_katia_2006_1.pdf) (accessed: 04.11.2017).
21. ACL – Agent Communication Language. Available at: <http://fipa.org/specs/fipa00061/SC00061G.pdf> (accessed: 04.11.2017).
22. RoboCup Soccer Server Available at: <http://swarm.cs.virginia.edu/robocup/documentation/manual.pdf> (accessed: 04.11.2017).
23. Vittikh V.A., Skobelev P.O. [Multi-agent Interaction Models for Constructing the Needs-and-Means Networks in Open Systems]. *Avtomatika i Telemekhanika – Automation and Remote Control*. 2003. vol. 1. pp. 177–185. (In Russ.).

24. Cougaar Agent Architecture. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cougaar> (accessed: 04.11.2017).
25. Technology Reports, Universal Description, Discovery, and Integration (UDDI). Available at: <http://xml.coverpages.org/uddi.html> (accessed: 04.11.2017).
26. Gorodeckij V.I., Buhvalov O.L., Skobelev P.O. Majorov I. Multi-agent Systems Industrial Applications: Current State and Prospects. *Upravlenie Bol'shimi sistemami – Large-Scale Systems Control*. 2017. vol. 66. pp. 94–157. (In Russ.).
27. Sierra C., Sabater J., Augusti J., Garcia P. SADDE: Social Agents Design Driven by Equations. Methodologies and software engineering for agent systems. Kluwer Academic Publishers. 2004. pp. 1–24.
28. Luck M., Gomez-Sanz J. Agent-oriented Software Engineering IX. 9th International Workshop (AOSE 2008). 2009. LNCS 5386. 287 p.
29. Garcia-Ojeda J.C., DeLoach S.A. AgentTool Process Editor: Supporting the Design of Tailored Agent-based Processes. Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing. 2009. pp. 707–714.
30. Nwana H.S., Ndumu D.T., Lee L.C., Collis J.C. ZEUS: A Toolkit for Building Distributed Multi-Agent Systems. *Applied Artificial Intelligence*. 1999. vol. 13. no. 1-2. pp. 129–185.
31. AgentBuilder – an integrated software toolkit that allows software developers to quickly develop intelligent software agents and agent-based applications. Available at: <http://www.agentbuilder.com/Documentation/brochures/ABFamilyBrochure.pdf> (accessed: 04.11.2017).
32. Burrafato P., Cossentino M. Designing a multi-agent solution for a bookstore with PASSI methodology. *Procs. Agent-Oriented Information Systems*. 2002. pp. 119–135.
33. Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Konushy V. Support for Analysis, Design and Implementation Stages with MASDK. International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering. 2008. pp. 272–287.
34. Rimassa G., Greenwood D., Kernland M.E. The Living Systems Technology Suite: An Autonomous Middleware for Autonomic Computing. International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS'06). 2006. pp. 33–33.
35. Gorodetsky V. Internet of Agents: From Set of Autonomous Agents to Network Object. Second International Workshop on Internet of Agents. 2017. pp. 1–17.
36. International Federation of Automatic Control (IFAC). Available at: <https://www.ifac-control.org/> (accessed: 04.11.2017).
37. Granichin O., Volkovich Z., Toledano-Kitai D. Randomized Algorithms in Automatic Control and Data Mining. Springer Series: Intelligent Systems Reference Library. 251 p. Available at: <http://www.twirpx.com/file/1562616/> (accessed: 04.11.2017).
38. Mayorov I., Skobelev P. Toward Thermodynamics of Real Time Scheduling. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2015. vol. 10. no. 3 pp. 21–223.
39. Gorodetsky V.I. [Multi-agent self-organization in B2B Networks]. *XII Vserossiyskoe soveshhanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [Proceedings of XII Russian Symposium on Control Problems]. pp. 8954–8965. Available at: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/vspu2014.zip> (accessed: 04.11.2017). (In Russ.).
40. Rzhnevski G., Skobelev P. Managing complexity. WIT Press. 2014. 156 p.
41. Skobelev P.O. [Industrial applications of Multi-agent technologies: To 20th anniversary of Samara School on Multi-agent Systems]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*. 2010. vol. 12. pp. 33–46. (In Russ.).
42. Skobelev P.O. [Real-time Intelligent Resource Management System: Principles of Development, Practical Experience and Perspectives] *Prilozheniye k Teoreticheskomu i Prikladnomu Zhurnalu "Informatsionnye Tekhnologii" – Annex to the Theoretical and Applied Journal "Information Technologies"*. 2013. vol. 1. pp. 1–32. (In Russ.).
43. Gorodetskii V.I. [Self-Organization and Multi-agent Systems: II. Applications and the Development Technology]. *Izvestija RAN: Teoriya i sistemy upravleniya – Proceedings*
44. Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 6(55). ISSN 2078-9181 (печ.), ISSN 2078-9599 (онлайн) [www.proceedings.spiiras.nw.ru](http://www.proceedings.spiiras.nw.ru)

- of the Russian Academy of Sciences: Theory and Control Systems*. 2012. vol. 3. pp. 102–123. (In Russ.).
44. Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. Fog computing and its role in the internet of things. Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. 2012. pp. 13–16.
  45. Yi Sh. et al. Security and Privacy Issues of Fog Computing: A Survey. International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications. 2015. LNCS 9204. pp. 685–695.
  46. Bukhvalov O., Gorodetsky V., Karsaev O., Koudriatsev G., Samoylov V. [Distributed Coordination in B2B Production Networks]. *Trudy Yuzhnogo Federalnogo Universiteta (Tekhnicheskie Nauki) – Transactions of South Federal University (Technical Sciences)*. 2013. vol. 3. pp. 193–203. (In Russ.).
  47. Gorodetsky V, Karsaev O., Samoylov V., Serebrykov S. Development tools for open agent networks. *Izvestija RAN: Teorija i sistemy upravlenija – Proceedings of the Russian Academy of Sciences: Theory and Control Systems*. 2008. vol. 3. pp. 106–124. (In Russ.).
  48. Hewitt C., Bishop P., Steiger R. A Universal Modular Actor Formalism for Artificial Intelligence. Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-1973). pp. 235–245.
  49. Bellifemine F., Poggi A., Rimassa G. JADE – A FIPA-compliant agent framework. JADE. Available at: <http://jmvidal.cse.sc.edu/library/jade.pdf> (accessed: 04.11.2017).

В.В. АРХИПОВ, В.Б. НАУМОВ  
**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОНОМНЫЕ  
УСТРОЙСТВА В КОНТЕКСТЕ ПРАВА: О РАЗРАБОТКЕ  
ПЕРВОГО В РОССИИ ЗАКОНА О РОБОТОТЕХНИКЕ**

---

*Архипов В.В., Наумов В.Б. Искусственный интеллект и автономные устройства в контексте права: о разработке первого в России закона о робототехнике.*

**Аннотация.** В настоящее время в России отсутствуют системные исследования в области регулирования робототехники как совокупности общественных отношений, предметом которых являются производство, распределение и использование автоматизированных технических систем. В связи с этим необходима разработка дорожной карты, подразумевающей, в том числе и разработку нового предметного законодательства. Регулирование робототехники должно строиться на междисциплинарных началах и включать гражданско-правовую, информационно-правовую и административно-правовую составляющие. При этом законодательство о робототехнике должно развиваться в несколько этапов. Прежде всего, с учетом анализа приоритетов и технологических возможностей, необходима подготовка и принятие государственной концепции развития отечественной робототехники с блоком вопросов, посвященных праву и законодательству. Затем — разработка и принятие основ законодательства в данной сфере, включающих классификацию роботов и сфер их применения, определение прав и обязанностей различных субъектов правоотношений, основания и порядок учета или регистрации моделей роботов и критерии отнесения роботов к источникам повышенной опасности. После разработки закона о робототехнике потребуются «пакетные» изменения в конкретных отраслях, где роботы уже внедряются или их внедрение ожидается. Последним этапом должна стать ведомственная корректировка подзаконных актов. Кроме того, в статье предлагается к рассмотрению текст первого законопроекта, призванного инициировать дискуссию в области правового регулирования робототехники.

**Ключевые слова:** робот, робототехника, право, законопроект о роботах, большие данные, Интернет вещей, правосубъектность.

---

**1. Введение.** Термин «робототехника» многозначен. В данной статье он используется в широком смысле и обозначает совокупность общественных отношений, предметом которых являются производство, распределение и, немного перефразируя классическое определение экономики, использование автоматизированных технических систем.

Полагаем допустимым утверждать, что в настоящий момент Россия серьезно отстает в развитии робототехники. Те возможности, которые могут возникнуть в связи с использованием роботов и искусственного интеллекта, не учитываются на государственном уровне. Это также приводит к отсутствию системных исследований в области регулирования робототехники.

В сложившихся условиях необходима разработка дорожной карты создания робототехнической отрасли в национальной экономике,

в рамках которой в качестве отдельного направления целесообразно выделить разработку нового предметного законодательства.

Действующие в мире законы объективно не отвечают вызовам и реалиям робототехники. Это признано в большинстве правовых актов. В целом это соответствует прошлым историческим закономерностям, когда государство и общество с большим опозданием начинали заниматься разработкой законодательства (скажем, как это имело место в сфере автомобильного транспорта или авиации). Последний пример — регулирование Интернета, которое сейчас идет семимильными шагами, но больше напоминает появление «норм-заплаток», нежели процесс предложения сбалансированной системы регулирования, хотя массовое использование Интернета в стране осуществляется уже более полутора десятков лет.

Сложность ситуации заключается в том, что тенденции развития технологий можно описать экспоненциальными зависимостями, а создание новых отраслей законодательства требует продуманного инерционного процесса и всестороннего междисциплинарного обсуждения моделей и подходов к формированию будущего правового поля. Особенно это справедливо для сферы использования передовых технологий, которые только начинают внедряться в жизнь человеческого общества и могут привести к социальной революции в связи с совершенно новыми появляющимися возможностями.

Таким образом, для создания качественного регулирования робототехники и искусственного интеллекта нужно время, которого становится все меньше и меньше. При этом еще в 2015 году автомобиль «Tesla S» на автопилоте проехал все США [1], а хирургический робот «Da Vinci» сегодня выполняет сложнейшие операции [2]. Но одновременно с этим происходят и закономерные печальные события. В 2015 году роботизированная рука убивает рабочего на заводе «Volkswagen» [3], а автомобиль «Tesla» на автопилоте попадает в аварию, унося жизнь своего водителя [4] (к слову, термин «водитель» в данном контексте уже может считаться несколько условным).

Неслучайно, что из-за фактов, подобных приведенным выше, а также в силу инерции мышления многие государства относятся к роботизации скептически и, соответственно, игнорируют необходимость исследований в сфере ее регулирования, что является серьезной ошибкой. Например, проблемой стала необходимость введения ответственности за действия/бездействия роботов, но соответствующих законов нет. Поэтому, когда данная проблема станет массовой, регулировать что-либо будет уже поздно. Потенциальную массовость в этом смысле можно рассматривать в качестве своеобразного индикатора актуальности общественных отношений для начала системного правового регулирования. При этом другим таким



индикатором может послужить выход автономных устройств за пределы узкоспециализированных общественных отношений, что также можно ожидать в скором будущем. Например, наиболее сложные станки с программным управлением вряд ли принципиально отличаются от роботов (как это понятие используется в настоящей публикации), однако станки такого вида применяются в строго определенной и обособленной — как юридически, так и «физически» — области, а именно в производстве. В то же время повсеместное распространение подобных устройств в иных областях человеческой деятельности, в представлении авторов, существенно обострит проблемы и потребность в правовом регулировании.

Отдельно следует отметить, что хотя приведенные выше примеры и относятся к другим юрисдикциям, в действительности они иллюстрируют общие правовые проблемы. Во-первых, вопросы правового регулирования отношений с применением искусственного интеллекта и автономных устройств находятся в «серой зоне» действующего права как в России, так и за рубежом, включая и более близкие правовые системы, относящиеся к романо-германской правовой семье, и более далекие, относящиеся к системам общего права. При этом необходимо подчеркнуть, что, несмотря на различия в основных источниках права и правовой культуре, природа права как такового одинакова — в каждом из случаев речь идет о необходимости создать определенные правовые (то есть имеющие общий и представительный характер) нормы, регулирующие поведение субъектов. На данном этапе рассмотрения проблемы вопрос об источнике права, который будет данные нормы содержать (что и выражает основные различия между правовыми системами) относится, скорее, к вопросам уже юридической техники. Во-вторых, будущее робототехники непременно будет требовать определенной доли унификации как, например, в случае с доставкой грузов беспилотными устройствами, которые могут преодолевать таким образом несколько юрисдикций.

**2. Разработка закона о робототехнике.** Следует признать, что, как и в большинстве стран мира, специальное регулирование робототехники в России отсутствует, есть только попытки крайне ограниченного точечного регулирования. Примером могут послужить поправки в Воздушный Кодекс РФ, направленные на регулирование дронов, либо промышленные стандарты. Например, с 1 января 2016 г. в России действует ГОСТ Р ИСО 8373–2014 «Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения».

Представляется, что при начале работы над будущим законодательством о робототехнике необходимо учитывать следующие обстоятельства.

Рассматриваемая сфера является междисциплинарной и потребуется ее регулирование в рамках нескольких отраслей права. Пока что в качестве ключевых можно выделить гражданское право, информационное право, а также административное право. Последнее должно обеспечить государственный контроль и безопасность использования роботов, но роль первых двух более сложная. При этом с научно-методологической точки зрения есть основания полагать, что исследователи правовых аспектов робототехники находятся в относительно «выгодных» позициях: критический этап анализа правовых проблем на пересечении права и технологии был пройден в момент становления регулирования Интернета [5].

Перед юридической наукой сейчас возникают крайне сложные задачи, требующие разобраться в философии и природе будущих правоотношений, определить, когда возможно создание сложных автономных систем, которые будут обладать волей и станут разумными в том обиходном понимании, которое сейчас описывается пока преимущественно в научно-фантастической литературе.

Помимо гражданско-правовых отношений с позиции информационного права отношения в области робототехники неизбежно затрагивают и пространство информационно-правовых отношений, поскольку роботы, обязательно обладающие информационной системой, которая в большинстве случаев будет иметь подключение к информационно-телекоммуникационным сетям. В связи с этим достаточно актуальным следует считать и рассмотрение проблем робототехники в контексте «Больших данных» [6], который сам по себе связан с критическим переосмыслением современных подходов к регулированию отношений, сопряженных с оборотом персональных данных [7]. Некоторые авторы идут дальше, говоря о том, что робототехника (в условиях современного информационного общества) впервые «соединяет» проблемы обработки данных с возможностью причинения физического вреда [8]. Очевидно, робототехника выводит на новый уровень и проблемы неприкосновенности частной жизни — но теперь уже в условиях, когда различные автономные устройства также могут включаться в процессы обработки данных [9]. Общая проблематика развития правовых подходов в условиях современного технологического прогресса уже активно исследуется в юридической литературе [10].

В декабре 2016 г. юридическая фирма Dentons по заказу Grishin Robotics разработала концепцию первого в России законопроекта о робототехнике (авторы законопроекта В. В. Архипов, В. Б. Наумов) [11].

Общим контекстом анализа правовых проблем робототехники также служит, образно говоря, экспоненциальный темп развития технологий, который не вполне соответствует темпу развития правовых концепций и норм — право естественным образом отстает от технологического развития [12]. Более того, в перспективе подходы к исследованию правовых проблем робототехники должны развиваться с учетом общего ландшафта, на котором пересекаются проблемы права и технологии — например технологии блокчейн, которая сама по себе составляет отдельное проблемное поле [13, 14].

Возвращаясь к рассматриваемому в настоящей публикации законопроекту, следует отметить, что это первый опыт по созданию подобного документа, который разработан для того, чтобы инициировать дискуссию о системном (а не нацеленном на регулирование отдельных аспектов отношений с участием роботов) законодательном регулировании в области робототехники.

Основная цель создания законопроекта на данном этапе — задать направление экспертной дискуссии по вопросам о том, как могут регулироваться отношения с участием роботов уже сейчас, чтобы заранее подготовиться к широкому распространению перспективных технологий в повседневной жизни.

На первом этапе создания законопроекта была сознательно принята упрощенная модель внесения поправок в гражданское законодательство. Это было сделано для того, чтобы после научной и практической дискуссии представить поправки не только в сам законопроект, но и разработать в качестве основного документа специальный законодательный акт о развитии робототехники в составе пакета, содержащего поправки не только в гражданское, но также административное, информационное право, а также ряд иных отраслей законодательства.

В указанном законопроекте особое место уделяется определению объектов и субъектов регулирования, идентификации участников правоотношений.

Предлагается выделить две предметных категории — «просто робот» (как *«устройство, способное действовать, определять свои действия и оценивать их последствия на основе информации, поступающей из внешней среды, без полного контроля со стороны человека»*), то есть элемент объекта регулирования, и «робот-агент», который, по замыслу авторов, наделяется специальной правосубъектностью, и между этими понятиями установить взаимосвязь — *«роботом-агентом признается робот, который по решению собственника и в силу конструктивных особенностей предназначен для участия в гражданском обороте. Робот-агент имеет*

*обособленное имущество и отвечает им по своим обязательствам, может от своего имени приобретать и осуществлять гражданские права и нести гражданские обязанности».*

При этом необходимо учитывать, что предложенный для начала дискуссии подход находится в контексте более широкого проблемного поля, которое может быть выражено через проблему соотношений понятий «робот» и «агент, наделенный искусственным интеллектом» в целом. По мнению некоторых авторов, в перспективе, вероятно, различие будет стираться по мере развития инноваций [15]. Отдельные авторы развивают представления о потенциальной правосубъектности роботов, предлагая определять их как «небиологических автономных агентов» [16]. В более широком контексте проблема автоматизированных действий (агентов) включается в комплекс юридической проблематики «Интернета вещей» [17].

По сути, особый интерес для теории права в дальнейшем будет представлять дискуссия о том, имеет ли смысл наделять роботов-агентов специальной ограниченной правосубъектностью, как это делается в законопроекте, где также проводятся параллели между юридическими лицами и роботами-агентами. В частности, при работе над законопроектом было уделено методологическое внимание теории фикции юридического лица, согласно которой юридические лица признаются «явлением, созданным правопорядком» [18].

Вполне вероятно, что вопрос о правосубъектности роботов как таковой пока еще не столь актуален на практике. В то же время он интересен как минимум для развития теории «на опережение», и при этом отдельные его стороны могут уже иметь и прикладное значение. Мировая правовая доктрина развивается примерно в этом ключе. К примеру, по мнению П. Асаро, к числу наиболее важных проблем в робототехнике, помимо ответственности существующих категорий субъектов права за действия роботов, относится проблема правового режима роботов как своего рода квазиагентов или посредников, ведь роботы постепенно наделяются все большим объемом функций, которые ранее исполнялись людьми [19]. При этом и в российской юридической литературе уже встречается постановка вопроса об ответственности робота как квазисубъекта гражданско-правовых отношений [20].

Итак, предлагаемый законопроект:

- устанавливает принципы правового регулирования отношений в области робототехники (в том числе признание особого правового режима роботов, обусловленного их спецификой);
- определяет состав законодательства Российской Федерации в области робототехники и устанавливает оговорки о том, в каком объеме

может применяться смежное законодательство — о персональных данных, об информации, о техническом регулировании и другое;

- определяет особенности роботов как объекта правовых отношений, в частности подразделяет роботов на категории в зависимости от критерия области применения (бытовые, используемые в отношениях с потребителями, медицинские, транспортные — пассажирские и грузовые — и т.п.);

- определяет общие принципы использования отдельных категорий роботов в зависимости от области применения;

- закрепляет общие права и обязанности каждого из субъектов правоотношений, включая производителей, продавцов, владельцев, обслуживающих организаций/специалистов.

- устанавливает особенности владения, пользования и распоряжения имуществом с точки зрения гражданского права, а также особенности применения отдельных норм имущественного права к роботам.

- устанавливает критерии, позволяющие относить отдельных роботов к источникам повышенной опасности, и определяет особенности применения норм гражданского законодательства об ответственности за причинение вреда при использовании источников общественной опасности;

- устанавливает принципы, связанные с доступом и использованием отдельных составляющих робота, в первую очередь, физической составляющей и информационных систем (кто имеет право на доступ к информационным системам робота, каковы особенности регулирования удаленных и (или) распределенных информационных систем робота).

В качестве ключевого административно-правового элемента правоотношений и с целью обеспечения безопасности предлагается регистрировать модели (а не все экземпляры) роботов-агентов уполномоченным государственным органом. Робот признается роботом-агентом и наделяется правоспособностью при условии добровольной регистрации его модели в специальном государственном реестре и с момента публичного заявления его собственника о начале его функционирования в таком статусе.

Отдельно вводится запрет о том, что при создании, техническом обслуживании и (или) эксплуатации роботов гражданского назначения не допускается включение в программную и (или) аппаратную часть роботов объектов, устройств и (или) функций, заведомо предназначенных для причинения вреда человеку, а также для совершения иных действий, нарушающих требования законодательства Российской Федерации.

Законопроект вызвал широкую дискуссию, и работа над ним продолжается.

**3. Законопроект о робототехнике.** Ниже для иллюстрации и полноты рассмотрения идей настоящей работы приводится проект федерального закона о робототехнике.

В настоящее время авторы работают над изменениями в проект федерального закона «О внесении изменений в Гражданский кодекс Российской Федерации в части совершенствования правового регулирования отношений в области робототехники», а также над проектом специального федерального закона в данной области.

Дополнительно подчеркиваем, что предлагаемый текст представляет собой, прежде всего, попытку сформулировать — в условиях современного российского законодательства и на основе теоретического моделирования — отправную точку для научных и практических дискуссий, и не претендует на статус документа, который может использоваться в законотворческом процессе непосредственно в таком виде.

Проект

«О внесении изменений в Гражданский кодекс Российской Федерации в части совершенствования правового регулирования отношений в области робототехники»

Статья 1

Внести в часть первую Гражданского кодекса Российской Федерации (Собрание законодательства Российской Федерации, 05.12.1994, № 32, ст. 3301) следующие изменения:

1) Дополнить Главой 5.1 следующего содержания:

«Глава 5.1. Роботы-агенты

Статья 127.1. Понятие робота-агента

1. Роботом-агентом признается робот, который по решению собственника и в силу конструктивных особенностей предназначен для участия в гражданском обороте. Робот-агент имеет обособленное имущество и отвечает им по своим обязательствам, может от своего имени приобретать и осуществлять гражданские права и нести гражданские обязанности. В случаях, установленных законом, робот-агент может выступать в качестве участника гражданского процесса.

2. Виды моделей роботов-агентов должны быть зарегистрированы их производителями в едином государственном реестре роботов-агентов. Порядок создания и ведения реестра роботов-агентов, а также орган, уполномоченный в области создания и ведения такого реестра, определяются в соответствии с федеральным законодательством о робототехнике.

3. Робот признается роботом-агентом и наделяется правоспособностью при условии регистрации его модели в едином государственном реестре роботов-агентов и с момента публичного заявления его собственника о начале его

функционирования в таком статусе. До момента таких регистрации и публичного заявления действия робота рассматриваются как действия его владельца в соответствии с общими правилами о роботах, установленными настоящим Кодексом, законом или иными правовыми актами.

Требования к указанному публичному заявлению, а также дополнительные условия начала, окончания и (или) приостановления правоспособности робота-агента определяются в соответствии с законодательством о робототехнике.

4. Регистрация моделей роботов-агентов является добровольной. К роботам, модели которых не зарегистрированы в качестве роботов-агентов, положения настоящей главы не применяются.

5. С момента исключения модели робота из реестра роботов-агентов ответственность за действия робота-агента перед третьими лицами несет собственник, с учетом условий, определенных договором между собственником и владельцем (владельцами), а также положений закона или иных правовых актов.

#### Статья 127.2. Владелец робота-агента

1. Под владельцем робота-агента следует понимать юридическое лицо, гражданина или иного робота-агента, которые используют такого робота-агента на праве собственности, хозяйственного ведения, оперативного управления, аренды или других законных основаниях.

2. Отношения между собственником, владельцем и (или) между владельцами робота-агента регулируются договорами, заключенными между сторонами. При отсутствии таких договоров владельцем робота-агента признается его собственник. Данные договоры заключаются в письменной форме и подлежат государственной регистрации в порядке, определенном уполномоченным органом в области робототехники.

3. В случае неустраимых сомнений относительно того, какое лицо является собственником и (или) владельцем робота-агента, в том числе возникших по причине технических сбоев, неисправностей или ошибок в функционировании робота-агента, собственником или владельцем робота-агента признается, соответственно, физическое или юридическое лицо, выступающее в качестве последнего собственника или владельца соответствующего робота-агента, в отношении которого такие неустраимые сомнения отсутствуют.

#### Статья 127.3. Ответственность за действия робота-агента

1. Собственник и владелец робота-агента несут ответственность за действия робота-агента в пределах находящегося в их собственности имущества, переданного во владение и (или) пользование робота-агента.

2. В случаях, когда ответственность робота-агента связана с его правовой природой как имущества (в том числе в случае причинения вреда деятельностью, создающей повышенную опасность для окружающих), ответственность за действие робота-агента несет его владелец в соответствии со статьей 1079 настоящего Кодекса.

3. В любом из случаев, указанных в настоящей статье, соответствующее лицо — собственник и (или) владелец робота-агента — несут ответственность за действия робота-агента, если не докажут, что основания для ответственности возникли в результате действий лица, осуществлявшего разработку, производство и (или) техническое обслуживание робота-агента.

4. Если иное не предусмотрено законом, лицо, осуществлявшее разработку, производство и (или) техническое обслуживание робота-агента несет ответственность в соответствии с настоящей статьей независимо от наличия вины.

#### Статья 127.4. Представительство с участием роботов-агентов

1. Роботы-агенты могут действовать от имени собственника и (или) владельца в качестве представителей.

2. Полномочие робота-агента действовать в качестве представителя подтверждается публичным заявлением собственника и (или) владельца робота-агента, а также записью в информационной системе робота-агента. Данная запись должна быть подписана электронной подписью, признаваемой равнозначной собственноручной подписи в соответствии с законодательством об электронной подписи. Лицо, уполномочившее робота-агента в соответствии с настоящим пунктом, обязано обеспечить доступность информации о факте уполномочивания и объеме полномочий каждому, кто вступает в договорные правоотношения с роботом-агентом до начала таких отношений.

3. При отсутствии обстоятельств, указанных в пункте 2 настоящей статьи, робот-агент признается действующим от своего лица.

#### Статья 127.5. Управление роботом-агентом

1. Если иное не предусмотрено договором между собственником и владельцем робота-агента, управление роботом-агентом осуществляется его непосредственным владельцем.

2. К действиям лица, управляющего роботом-агентом, могут применяться по аналогии положения гражданского законодательства о высшем органе управления юридического лица постольку, поскольку это не противоречит природе отношений с участием робота-агента.

3. Управление роботом-агентом осуществляется посредством изменения параметров программы для ЭВМ, базы данных и (или) информационной системы робота-агента.

4. Лицо, управляющее роботом-агентом, имеет право под свою ответственность привлекать третьих лиц к осуществлению такого управления.

5. Не являются управлением роботом-агентом любые действия, связанные с изменением функциональности и (или) изменением модели робота-агента. Собственникам и владельцам роботов-агентов запрещается вносить изменения в модель робота-агента, определенную в едином государственном реестре роботов-агентов. В случае внесения таких изменений данное лицо (собственник или владелец, в зависимости от ситуации) обязан обеспечить приостановление деятельности робота-агента до внесения соответствующих изменений в реестр.

#### Статья 127.6. Правоспособность робота-агента

1. Роботы-агенты могут принимать участие в гражданском обороте исключительно в тех видах деятельности, которые устанавливаются уполномоченным органом Российской Федерации в области робототехники.

2. Уполномоченный орган Российской Федерации в области робототехники вправе ограничивать случаи участия роботов-агентов и в пределах одного вида деятельности, а также устанавливать иные ограничения и (или) требования, применимые к роботам-агентам, их собственникам, владельцам и иным лицам, участвующим в отношениях с роботами-агентами.



#### Статья 127.7. Представление интересов робота-агента

1. Если иное не установлено настоящим Кодексом, законом, иными правовыми актами, договором между собственником и (или) владельцем робота-агента, робот-агент представляет свои интересы в гражданском обороте самостоятельно, в пределах своих конструктивных особенностей и возможностей информационной системы.

2. Каждый робот-агент должен быть оснащен функцией экстренного информирования о возникновении правового конфликта, который не может быть разрешен исходя из конструктивных особенностей и возможностей его информационной системы. Лица, вступающие в отношения с роботом-агентом, должны иметь возможность воспользоваться данной функцией, но при этом несут ответственность за причиненные убытки в случае необоснованного использования такой функции.

3. В случае если будет задействована функция экстренного информирования, указанная в пункте 2 настоящей статьи, правовые отношения с лицом, задействовавшим данную функцию, считаются приостановленными до вступления в отношения последнего собственника и (или) владельца робота-агента — физического или юридического лица.

4. Интересы роботов-агентов в судах, правоохранительных органах, а также иных органах или организациях, требующих непосредственного участия человека, могут представлять только физические или юридические лица, являющиеся собственниками таких роботов-агентов.

#### Статья 127.8. Саморегулирование в области робототехники

1. В соответствии с федеральным законодательством в области робототехники может предусматриваться создание саморегулируемых организаций в области робототехники.

2. В пределах, предусмотренных федеральным законодательством в области робототехники, саморегулируемые организации в области робототехники могут разрабатывать отраслевые стандарты и кодексы надлежащего поведения, обязательные для соблюдения собственниками и владельцами роботов-агентов, а также самими роботами-агентами.

3. Соблюдение отраслевых стандартов и кодексов надлежащего поведения в области робототехники роботами-агентами может обеспечиваться посредством изменения параметров программ для ЭВМ, баз данных и (или) информационных систем роботов-агентов.

2) Дополнить статью 138 следующего содержания:

#### «Статья 138. Роботы

Понятие робота определяется в соответствии с положениями федерального законодательства в области робототехники.

К роботам применяются общие правила об имуществе, постольку, поскольку настоящим Кодексом, законом или иными правовыми актами не установлено иное.

При создании, техническом обслуживании и (или) эксплуатации роботов гражданского назначения не допускается включение в программную и (или) аппаратную часть роботов объектов, устройств и (или) функций, заведомо предназначенных для причинения вреда человеку, а также для совершения иных действий, нарушающих требования законодательства Российской Федерации».

## Статья 2

Внести в часть вторую Гражданского кодекса Российской Федерации (Собрание законодательства Российской Федерации, 29.01.1996, № 5, ст. 410) следующие изменения:

Дополнить статью 1079 пунктом 4 следующего содержания:

«Робот признается источником повышенной опасности в случае, если в силу его конструктивных особенностей и (или) параметров его информационной системы, его действия создают повышенную вероятность причинения вреда из-за невозможности полного контроля за ней со стороны человека.

Роботы, являющиеся роботами-агентами, для целей настоящей статьи рассматриваются как имущество, за исключением роботов-агентов, указанных в абзаце третьем пункта 4 настоящей статьи.

Роботы-агенты, выступающие в качестве субъектов правоотношений и являющиеся владельцами других роботов-агентов, несут ответственность за вред, причиненный деятельностью, создающей повышенную опасность для окружающих, независимо от вины.

Положения настоящей статьи не применяются к случаям, когда роботы-агенты выступают в качестве субъектов правоотношений и совершают сделки от своего лица, в том числе вступают в договорные отношения с другими лицами».

## Статья 3

Настоящий Федеральный закон является частью федерального законодательства в области робототехники.

С момента вступления в силу настоящего Федерального закона и до вступления в силу федерального закона, регулирующего отношения в области робототехники:

- 1) Используется следующее основное понятие: робот — устройство, способное действовать, определять свои действия и оценивать их последствия на основе информации, поступающей из внешней среды, без полного контроля со стороны человека.
- 2) Положения гражданского законодательства о роботах не применяются к программам для ЭВМ, которые, хотя и способны действовать, определять свои действия и оценивать их последствия без полного контроля со стороны человека по результатам обработки информации, поступающей из внешней среды, при этом не являются частью информационной системы обособленного устройства, предназначенного полностью или в части для осуществления фактических действий в автономном режиме.
- 3) Уполномоченным органом Российской Федерации в области робототехники, а также уполномоченным органом Российской Федерации в области создания и ведения реестра роботов-агентов является Правительство Российской Федерации.

**4. Заключение.** Представляется, что рассматриваемая инициатива может лечь в основу развития отечественного нормотворчества в области робототехники. На базе всесторонней междисциплинарной дискуссии, в которой, наряду с юристами, должны участвовать разработчики ИТ-систем, роботов и систем искусственного интеллекта, философы, социологи, политики и

экономисты, можно предложить четыре последовательных шага для построения будущей стратегии развития предметного российского законодательства.

На первом этапе необходимо определиться со стратегией развития, государственными приоритетами, технологическими возможностями и потенциалом в области робототехники в стране, которые, в свою очередь, дадут возможность подготовить и принять государственную концепцию развития отечественной робототехники, включая блок вопросов, посвященных праву и законодательству.

Вторым этапом развития законодательства может быть разработка и принятие основ законодательства в этой сфере, например в формате специального федерального закона «О робототехнике в Российской Федерации».

Такой закон мог бы стать базовым документом, на основе и в соответствии с которым могли бы вноситься последующие изменения в нормативную базу. В нем было бы целесообразно дать классификации роботов и сфер их применения, детально раскрыть права и обязанности субъектов правоотношений, включая производителей, продавцов, владельцев и пользователей роботов. Необходимо также в указанном акте установить основания и порядок учета или регистрации моделей роботов и установить критерии отнесения роботов к источникам повышенной опасности.

Отдельное внимание в документе должно быть уделено вопросам сорегулирования правоотношений, когда для сферы робототехники должно активно применяться гражданской, административное, информационное и иные отрасли законодательства.

Особого внимания в рассматриваемой сфере заслуживает не только административная и гражданско-правовая проблематика, но и вопросы использования роботов как информационных систем, когда задачи регулирования доступа к ним и в широком смысле информационного взаимодействия роботов с внешней средой, включая задачу обеспечения их информационной безопасности, становятся одними из самых важных на практике.

После разработки закона о робототехнике потребуются «пакетные» изменения в конкретных отраслях, где внедряются или ожидается внедрение роботов. По сути, это основные изменения в ключевые законы и кодексы, например ГК, УК, КоАП, Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», Закон «О защите прав потребителей», ФЗ «О техническом регулировании», а также отраслевые законы: ФЗ «О безопасности дорожного движения», ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан» и так далее.

Наконец, последним завершающим этапом могли бы выступить ведомственные корректировки подзаконных актов, регламентирующих соответствующую сферу — административных регламентов, технических регламентов, указов и постановлений и так далее. Последний уровень является крайне важным, так как именно на нем конкретизируются процедуры непосредственного применения общих правил.

### Литература

1. Владелец Tesla проехал все США абсолютно бесплатно. URL: <http://www.delfi.lv/avto/na-kolesah/vladelec-tesla-proechal-vse-ssha-absolyutno-besplatno.d?id=44084741> (дата обращения: 06.07.2017).
2. The da Vinci Surgical System. URL: <http://www.davincisurgery.com/da-vinci-surgery/da-vinci-surgical-system/> (дата обращения: 06.07.2017).
3. Robot Kills worker at Volkswagen plant in Germany // The Guardian. URL: <https://www.theguardian.com/world/2015/jul/02/robot-kills-worker-at-volkswagen-plant-in-germany> (дата обращения: 06.07.2017).
4. Tesla driver in fatal 'Autopilot' crash got numerous warnings: U.S. government // Reuters. URL: <https://www.reuters.com/article/us-tesla-crash-idUSKBN19A2XC> (дата обращения: 06.07.2017).
5. *Calo R.* Robots in American Law // University of Washington School of Law Research. Paper no. 2016-04. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2737598](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2737598) (дата обращения: 06.07.2017).
6. *Balkin J.M.* The Three Laws of Robotics in the Age of Big Data // Ohio State Law Journal. 2017. vol. 78. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2890965](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2890965) (accessed: 06.07.2017).
7. *Савельев А.И.* Проблемы применения законодательства о персональных данных в эпоху «Больших данных» (Big Data) // Право. Журнал Высшей школы экономики. 2015. № 1. С. 43–66.
8. *Calo R.* Robotics and the Lessons of Cyberlaw // California Law Review. 2015. vol. 7. pp. 513–563.
9. *Calo R.* Robots and Privacy // Robot ethics: the ethical and social implications of robotics. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1599189](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1599189) (дата обращения: 06.07.2017).
10. *Arkhipov V., Naumov V.*, The legal definition of personal data in the regulatory environment of the Russian Federation: Between formal certainty and technological development // Computer Law & Security Review. 2016. vol. 32. Issue 6. pp. 868–887.
11. Юристы и фантастика: Dentons разработала первый в России законопроект о робототехнике. URL: <http://www.dentons.com/ru/whats-different-about-dentons/connecting-you-to-talented-lawyers-around-the-globe/news/2016/december/dentons-develops-russias-first-ever-robotics-draft-law> (дата обращения: 06.07.2017).
12. *Fenwick M., Kaal W.A., Vermeulen E.P.M.* Regulation Tomorrow: What Happens when Technology is Faster than the Law? // Tilburg University Discussion. Paper no. DP 2016-024. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2834531](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2834531) (дата обращения: 06.07.2017).
13. *Булгаков И.Т.* Правовые вопросы использования технологии блокчейн // Закон. 2016. № 12. С. 81–88.

14. *Савельев А.И.* Договорное право 2.0: «Умные» контракты как начало конца классического договорного права // Вестник гражданского права. 2016. № 3. С. 32–59.
15. *Balkin J.M.* The Path of Robotics Law // California Law Review Circuit. 2015. vol. 6. pp. 45–60.
16. *Richards N.M., Smart W.D.* How Should The Law Think About Robots? URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2263363](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2263363) (дата обращения: 06.07.2017).
17. *Архипов В.В., Наумов В.Б., Пчелинцев Г.А., Чирко Я.А.* Открытая концепция регулирования Интернета вещей // Информационное право. 2016. № 2. С. 18–25.
18. *Гуцин В.В.* Понятие и классификация юридических лиц // Современный юрист. № 3. 2015. С. 20–28.
19. *Asaro P.M.* Robots and Responsibility from a Legal Perspective. URL: <http://www.roboethics.org/icra2007/contributions/ASARO%20Legal%20Perspective.pdf> (дата обращения 06.07.2017).
20. *Ирискина Е.Н., Беляков К.О.* Правовые аспекты гражданско-правовой ответственности за причинение вреда действиями робота как квазисубъекта гражданско-правовых отношений // Гуманитарная информатика. 2016. Вып. 10. С. 63–72.

**Архипов Владислав Владимирович** — к-т юрид. наук, доцент кафедры теории и истории, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), советник, Международная юридическая фирма Dentons. Область научных интересов: общая теория права, история и методология юридической науки, право интеллектуальной собственности, история правовых и политических учений, право информационных технологий, правовые аспекты компьютерных игр и виртуальных миров, правовые аспекты персональных данных, правовое регулирование отношений в сети Интернет, правовые аспекты робототехники. Число научных публикаций — 42. [vladislav.arkhipov@gmail.com](mailto:vladislav.arkhipov@gmail.com), <http://arkhipov.info>; Невский проспект, 32-34, лит. А, Санкт-Петербург, 191011; р.т.: +79219204084, Факс: +78123258454.

**Наумов Виктор Борисович** — к-т юрид. наук, доцент кафедры государственного и административного права, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), старший научный сотрудник сектора информационного права, Институт государства и права Российской академии наук, руководитель российской практики по интеллектуальной собственности, информационным технологиям и телекоммуникациям, партнер, Международная юридическая фирма Dentons. Область научных интересов: право интеллектуальной собственности, право информационных технологий, правовые аспекты персональных данных, правовое регулирование отношений в сети Интернет, правовые аспекты робототехники, государственное управление в области инновационных технологий, инновационная экономика. Число научных публикаций — 60. [nauc@russianlaw.net](mailto:nauc@russianlaw.net), <http://russianlaw.net>; Невский проспект, 32-34, лит. А, Санкт-Петербург, 191011; р.т.: +7(812)325-8444, Факс: +7(812) 325-84-54.

V.V. ARKHIPOV, V.B. NAUMOV  
**ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND AUTONOMOUS DEVICES IN  
 LEGAL CONTEXT: ON DEVELOPMENT OF THE FIRST  
 RUSSIAN LAW ON ROBOTICS**

---

*Arkhipov V.V., Naumov V.B. Artificial Intelligence and Autonomous Devices in Legal Context: on Development of the First Russian Law on Robotics.*

**Abstract.** Currently in Russia there is no systematic research in the area of robotics as a complex of social relationships the object of which comprises production, distribution and use of automated technical systems. In connection with this it is required to develop a roadmap which implies, *inter alia*, development of new legislation on the matter. Regulation of robotics shall be built on the interdisciplinary bases and include civil law, informational law and administrative law components. That being said, the legislation on robotics shall be developed in several stages. First of all, pursuant to analysis of priorities and technological capabilities – preparation and adoption of the state concept of development of the Russian robotics including a set of questions related to law and legislation. Then, development and adoption of the basic legislation in this area including classification of robots and spheres of their application, determining rights and duties of various subjects of relationships, grounds and procedure for accounting or registration of robot models and criteria of relating robots to sources of increased danger. After developing the law on robotics “package” changes will be required in specific sectors where robots are or will be implemented. The final stage shall include departmental correction of subordinate legislation. The article contains the text of the first draft bill which aims at initiating the discussion in the area of legal regulation of robotics.

**Keywords:** robot, robotics, law, draft bill on robotics, Big Data, Internet of Things, legal capacity.

---

**Arkhipov Vladislav Vladimirovich** — Ph.D., associate professor of theory and history of state and law department, Saint Petersburg State University, Of counsel at the Russian practice of intellectual property, information technologies and telecommunications, International law firm Dentons. Research interests: general jurisprudence, history and methodology of legal science, intellectual property law, history of legal and political teachings, information technologies law, legal aspects of computer games and virtual worlds, legal aspects of personal data, legal regulation of relationships in the Internet, legal aspects of robotics. The number of publications — 42. vladislav.arkhipov@gmail.com, <http://arkhipov.info>; 32-34, Nevsky Prospect, lit. A, St. Petersburg, 191011, Russia; office phone: +79219204084, Fax: +78123258454.

**Naumov Victor Borisovich** — Ph.D., associate professor of state and administrative law department, Saint Petersburg State University, senior researcher of the sector for informational law, Institute for State and Law of the Russian Academy of Sciences, Institute for State and Law of the Russian Academy of Sciences, head of the Russian practice of intellectual property, information technologies and telecommunications, partner, International law firm Dentons. Research interests: intellectual property law, information technologies law, legal aspects of personal data, legal regulation of relationships in the Internet, legal aspects of robotics, state management in the area of innovative technologies, innovative economy. The number of publications — 60. nau@russianlaw.net, <http://russianlaw.net>; 32-34, Nevsky Prospect, lit. A, St. Petersburg, 191011, Russia; office phone: +7(812)325-8444, Fax: +7(812) 325-84-54.

### References

1. Vladelec Tesla proechal vse SShA absolutno besplatno [The owner of Tesla drove the whole of the US absolutely free of charge]. Available at: <http://www.delfi.lv/avto/nakolesah/vladelec-tesla-proechal-vse-ssha-absolutno-besplatno.d?id=44084741> (accessed: 06.07.2017). (In Russ.).

2. The da Vinci Surgical System. Available at: <http://www.davincisurgery.com/da-vinci-surgery/da-vinci-surgical-system/> (accessed: 06.07.2017).
3. Robot Kills worker at Volkswagen plant in Germany. *The Guardian*. Available at: <https://www.theguardian.com/world/2015/jul/02/robot-kills-worker-at-volkswagen-plant-in-germany> (accessed: 06.07.2017).
4. Tesla driver in fatal 'Autopilot' crash got numerous warnings: U.S. government. *Reuters*. Available at: <https://www.reuters.com/article/us-tesla-crash-idUSKBN19A2XC> (accessed: 06.07.2017).
5. Calo R. Robots in American Law. University of Washington School of Law Research. Paper no. 2016-04. Available at: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2737598](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2737598) (accessed: 06.07.2017).
6. Balkin J.M. The Three Laws of Robotics in the Age of Big Data. *Ohio State Law Journal*. 2017. vol. 78. Available at: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2890965](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2890965) (accessed: 06.07.2017).
7. Savelyev A.I. [Problems of application of the personal data legislation in the age of "Big Data"] *Pravo: zhurnal Vyschei shkoly ekonomiki – Law: journal of Higher School of Economics*. 2015. vol. 1. pp. 43–66. (In Russ.).
8. Calo R. Robotics and the Lessons of Cyberlaw. *California Law Review*. 2015. vol. 7. pp. 513–563.
9. Calo R. Robots and Privacy. Robot ethics: the ethical and social implications of robotics. Available at: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1599189](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1599189) (accessed: 06.07.2017).
10. Arkhipov V., Naumov V., The legal definition of personal data in the regulatory environment of the Russian Federation: Between formal certainty and technological development. *Computer Law & Security Review*. 2016. vol. 32. Issue 6. pp. 868–887.
11. Juristy i fantastika: Dentons razrabotala pervyj v Rossii zakonoproekt o robototekhnike [Lawyers and science fiction: Dentons develops first robotics draft law in Russia]. Available at: <http://www.dentons.com/ru/whats-different-about-dentons/connecting-you-to-talented-lawyers-around-the-globe/news/2016/december/dentons-develops-russias-first-ever-robotics-draft-law> (accessed: 06.07.2017). (In Russ.).
12. Fenwick M., Kaal W.A., Vermeulen E.P.M. Regulation Tomorrow: What Happens when Technology is Faster than the Law? Tilburg University Discussion. Paper no. DP 2016-024. Available at: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2834531](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2834531) (accessed: 06.07.2017).
13. Bulgakov I.T. [Legal issues of use of blockchain technology]. *Zakon – The Law*. 2016. vol. 12. pp. 81–88. (In Russ.).
14. Savelyev A.I. [Contract law 2.0: "Smart" contracts as the beginning of the end of classic contract law]. *Vestnik grazhdanskogo prava – Herald of the civil law*. 2016. vol. 3. pp. 32–59. (In Russ.).
15. Balkin J.M. The Path of Robotics Law. *California Law Review Circuit*. 2015. vol. 6. pp. 45–60.
16. Richards N.M., Smart W.D. How Should The Law Think About Robots? Available at: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2263363](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2263363) (accessed: 06.07.2017).
17. Arkhipov V.V., Naumov V.B., Pchelintsev G.A., Chirko Y.A. [Open concept of legal regulation of the Internet of Things]. *Informatsionnoye pravo – Informational law*. 2016. vol. 2, pp. 18–25. (In Russ.).
18. Guschin V.V. [Concept and classification of legal entities]. *Sovremenniy yurist – Modern lawyer*. 2015. vol. 3. pp. 20–28. (In Russ.).
19. Asaro P.M. Robots and Responsibility from a Legal Perspective. Available at: <http://www.robethics.org/icra2007/contributions/ASARO%20Legal%20Perspective.pdf> (accessed: 06.07.2017).
20. Iriskina E.N., Belyakov K.O. [Legal aspects of civil responsibility for inflicting of harm by actions of robot as quasi-subject of civil-law relationships]. *Gumanitarnaya informatica – Humanitary informatics*. 2016. vol. 10. pp. 63–72. (In Russ.).

С.А. АЛЕКСАНДРОВА, С.В. БЫСТРОВ, Н.А. ВУНДЕР, О.В. СЛИТА,  
А.В. УШАКОВ

## СИНТЕЗ РОБАСТНОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МИНИМИЗАЦИИ ОЦЕНКИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ИНТЕРВАЛЬНОСТИ СЛЕДА ЕЕ МАТРИЦЫ СОСТОЯНИЯ

---

*Александрова С.А., Быстров С.В., Вундер Н.А., Слита О.В., Ушаков А.В. Синтез робастной непрерывной системы на основе минимизации оценки относительной интервальности следа ее матрицы состояния.*

**Аннотация.** В работе предлагается алгоритм синтеза устройства управления непрерывным техническим объектом, модель которого характеризуется неопределенными параметрами, заданными в интервальной форме, доставляющего системе, в которую он входит, параметрическую робастность. Для обеспечения робастности проектируемой системы использована концепция относительной интервальности интервальных математических объектов: скаляр, вектор, численная характеристика матрицы, в качестве которой в алгоритме синтеза использован ее след. Задача решается методом медианного модального управления на требуемые значения стандартных показателей качества системы, дополненного контролем оценки относительной интервальности следа интервальной матрицы состояния спроектированной системы, которая принимается за критерий робастности. Показано, что если желаемое медианное поведение проектируемой системы задается с помощью модели, матрица состояния которой имеет кратные собственные числа кратности равной размерности вектора состояния, то относительная интервальность следа интервальной матрицы проектируемой системы совпадает с относительной интервальностью ее кратного интервального собственного числа. При этом появляется возможность изменения относительной интервальности интервального следа матрицы состояния проектируемой системы с помощью механизма изменения его медианной составляющей, реализуемого введением обратной связи по вектору состояния непрерывного технического объекта. Полученные результаты иллюстрируются примером.

**Ключевые слова:** интервальные системные параметры, оценка относительной интервальности, медианные значения, модальное управление, след матрицы, робастность.

---

**1. Введение.** Проблема синтеза робастной непрерывной системы на основе минимизации оценки относительной интервальности следа ее матрицы состояния вынесена в заголовок статьи в связи со следующими обстоятельствами. Проблема робастности непрерывных динамических систем подобно проблеме их устойчивости относится к разряду вечных в современной теории и практике управления. Если устойчивость является гарантией работоспособности проектируемых систем, то робастность является гарантией стабильности их основных показателей качества. В настоящее время под робастностью понимается малая чувствительность [1, 2] показателей качества систем к неопределенности их параметров [3-5], точнее параметров технических объектов, входящих в состав систем. Параметрическая неопределенность порождается многими причинами [6, 7]. Это и технологический разброс при производ-



стве компонентов системы, изменение параметров под действием физических условий эксплуатации, естественное старение, экстремальные ситуации, которые могут скачкообразно изменить параметры. В общем, система разрабатывается при одних (номинальных, паспортных) значениях параметров, техническая реализация системы наделяет ее компоненты другими значениями параметров, а в фазе эксплуатации параметры компонентов приобретают третьи значения. Параметры системы принято разделять на физические и системные. Физическими параметрами являются: длина, радиус, объем, масса, момент инерции, вязкость среды, жесткость, электрическое сопротивление, электрическая емкость конденсаторов, индуктивность проводных систем и так далее. Системными параметрами являются коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточных функций в случае использования моделей «вход — выход» [8, 9], а также элементы матриц входа, состояния и выхода в случае использования моделей «вход — состояние — выход» [10-13] метода пространства состояний. Так как для разработчика системы технический объект — это математическая модель технического объекта, то в дальнейшем, говоря о параметрах системы, будут в основном иметься в виду ее системные параметры.

В статье для описания неопределенности системного параметра используются возможности интервальных [14, 15] представлений, которые позволяют неопределенные параметры представить интервальными числами, задаваемыми двумя фиксированными числами, определяющими граничные значения неопределенного параметра. От представления интервального числа с помощью двух граничных его значений можно осуществить переход [4] к трехкомпонентному его представлению. Компонентами этого представления являются: медианное значение интервального числа и два равных по модулю, но разных по знаку фиксированных числа, задающих диапазон вариации интервального числа в центрированной относительно его медианного значения форме. Трехкомпонентное представление интервального числа позволяет охарактеризовать его [4] оценкой относительной интервальности, которая в дальнейшем используется в качестве меры достигаемой в результате процедуры синтеза системы ее робастности.

Следует заметить, что если в состав проектируемой системы входит технический объект с интервальными параметрами, скажем, его матрицы состояния, то все показатели качества системы будут также интервальными. Будут интервальными: длительность переходного процесса, значение перерегулирования, величина добротности по скорости, полосы пропускания на уровне заданных значений амплитудных ча-

стотных характеристик по выходу и ошибке при гармоническом экзогенном воздействии, собственные числа матрицы состояния, норма и след этой матрицы. При этом оценки относительной интервальности перечисленных математических объектов с одной стороны связаны с оценкой относительной интервальности исходных интервальных параметров технического объекта, с другой — они могут быть изменены в силу определения оценки относительной интервальности увеличением медианной составляющей интервального математического объекта в процессе процедуры синтеза проектируемой системы.

При синтезе алгоритма управления предлагается уменьшение оценки относительной интервальности следа матрицы состояния проектируемой системы для решения указанной задачи. След матрицы состояния как сумма ее собственных значений достаточно информативен и характеризуется простотой вычисления как суммы ее диагональных элементов.

Статья организована следующим образом. В разделе «Постановка задачи» приводится модель технического объекта с интервальной матрицей состояния и ставится задача синтеза закона управления, который учитывал бы значение оценки относительной интервальности следа матрицы состояния проектируемой непрерывной системы. В разделе «Концепция управляемой относительной интервальности следа квадратной матрицы» показано, что если создать механизм изменения относительной интервальности следа матрицы с целью ее минимизации, то появляется возможность управления робастностью динамических свойств проектируемой системы путем минимизации относительной интервальности собственных чисел ее матрицы состояния. В разделе «Основной результат» приводится алгоритм синтеза робастной интервальной системы методом медианного модального управления, дополненного процедурой минимизации оценки относительной интервальности следа ее интервальной матрицы состояния. Статья заканчивается примером использования предложенной авторами методики.

**2. Постановка задачи.** Рассмотрим непрерывный технический объект с интервальными параметрами, заданный в форме «вход-состояние-выход» (BCB):

$$\dot{x}(t) = [A]x(t) + Bu(t), y(t) = Cx(t), \varepsilon(t) = g(t) - y(t), \quad (1)$$

В (1)  $x$ ,  $u$ ,  $y$ ,  $g$  и  $\varepsilon$  — соответственно векторы состояния, управления, выхода, внешнего (экзогенного) воздействия и ошибки слежения;  $[A] = A_0 + [\Delta A]$  — интервальная матрица состояния с медианной составляющей  $A_0$  и интервальной  $[\Delta A]$ ,  $B$ ,  $C$  — матрицы управ-

ления и выхода с фиксированными параметрами. Перечисленные компоненты имеют размерности:  $\dim(x) = n$ ,  $\dim(u) = r$ ,  $\dim(y) = \dim(g) = \dim(\varepsilon) = m$ ,  $\dim[A] = n \times n$ ,  $\dim(B) = n \times r$ ,  $\dim(C) = m \times n$ . Очевидно, что для такого технического объекта (ТО) интервальными являются и такие скалярные характеристики матрицы состояния, как норма, собственные числа, а также след матрицы.

В результате синтеза закона управления интервальным ТО требуется получить непрерывную робастную систему, медианные значения показателей качества которой в переходном режиме, таких как перерегулирование и длительность переходного процесса, и в установившемся режиме, таких как добротность по скорости, полосы пропускания на уровне заданных значений амплитудных частотных характеристик по выходу и ошибке, а также значение оценки относительной интервальности следа ее матрицы состояния, удовлетворяют заданным требованиям.

Поставим задачу синтезировать для ТО (1) закон управления вида:

$$u(t) = K_g g(t) - Kx(t), \quad (2)$$

где  $K_g$  — матрица прямых связей по задающему воздействию,  $K$  — матрица обратных связей по вектору состояния, который обеспечивал бы желаемое качество процессов по выходной переменной замкнутой непрерывной системы:

$$\dot{x}(t) = [F]x(t) + Gg(t), x(0), y(t) = Cx(t), [F] = [A] - BK, G = BK_g \quad (3)$$

в переходном и установившемся режимах. При этом для обеспечения робастности основных показателей качества проектируемой системы алгоритм синтеза закона управления дополнен процедурой минимизации значения оценки относительной интервальности следа интервальной матрицы состояния.

**3. Концепция управляемой относительной интервальности следа квадратной матрицы.** Интервальным числом называется [14] пара чисел  $(\underline{\alpha}, \bar{\alpha})$ , задающих его левое  $\underline{\alpha}$  и правое  $\bar{\alpha}$  граничные значения. Оно записывается в форме  $[\alpha] = [\underline{\alpha}, \bar{\alpha}]$ . Такую запись интервального числа можно дополнить его представлением, использующим три компонента:

$$[\alpha] = [\underline{\alpha}, \bar{\alpha}] = [\alpha_0] + [\Delta\alpha] = [\alpha_0, a_0] + [\underline{\Delta a}, \bar{\Delta a}] = \alpha_0 + [\Delta\alpha], \quad (4)$$

где  $\alpha_0$  — медианное значение интервального числа  $[\alpha]$ ,  $[\Delta\alpha]$  — центрированная относительно  $\alpha_0$  интервальная составляющая интервального числа,  $\underline{\Delta\alpha}, \overline{\Delta\alpha}$  — левое и правое граничные значения интервальной составляющей интервального числа соответственно. Компоненты трехэлементного представления интервального числа удовлетворяют соотношениям:

$$\alpha_0 = 0.5(\underline{\alpha} + \overline{\alpha}), \underline{\Delta\alpha} = \underline{\alpha} - \alpha_0, \overline{\Delta\alpha} = \overline{\alpha} - \alpha_0, \overline{\Delta\alpha} = -\underline{\Delta\alpha}, \quad (5)$$

где  $\overline{\Delta\alpha}$  — положительна,  $\underline{\Delta\alpha}$  — отрицательна для любых  $[\alpha]$ .

В соотношениях (4)  $\alpha_0, \underline{\alpha}, \overline{\alpha}, \underline{\Delta\alpha}, \overline{\Delta\alpha}$  являются фиксированными, а не интервальными числами. Используем соотношение (5) и зададим оценку  $\delta_1\alpha$  относительной интервальности интервального числа  $[\alpha]$  в форме:

$$\delta_1\alpha = \frac{\overline{\Delta\alpha}}{|\alpha_0|} = \frac{-\underline{\Delta\alpha}}{|\alpha_0|}. \quad (6)$$

С помощью выражения (6) можно управлять относительной интервальностью интервального числа путем изменения его медианной составляющей. Изменение медианной составляющей может быть осуществлено в мультипликативной или аддитивной формах. Действительно, пусть числа  $\beta$  и  $\gamma$  таковы, что выполняются условия:

$$\tilde{\alpha}_0 = \alpha_0\beta, \tilde{\tilde{\alpha}}_0 = \alpha_0 + \gamma: |\tilde{\alpha}_0| > |\alpha_0|, |\tilde{\tilde{\alpha}}_0| > |\alpha_0|. \quad (7)$$

По существу, введением мультипликативного компонента  $\beta$  или аддитивного компонента  $\gamma$  осуществляется формирование новых интервальных чисел  $[\tilde{\alpha}] = \tilde{\alpha}_0 + [\Delta\alpha]$  и  $[\tilde{\tilde{\alpha}}] = \tilde{\tilde{\alpha}}_0 + [\Delta\alpha]$ , обладающих меньшим значением оценки относительной интервальности так, что выполняется неравенства:

$$\delta_1\tilde{\alpha} = \frac{\overline{\Delta\alpha}}{|\tilde{\alpha}_0|} < \delta_1\alpha = \frac{\overline{\Delta\alpha}}{|\alpha_0|}, \delta_1\tilde{\tilde{\alpha}} = \frac{\overline{\Delta\alpha}}{|\tilde{\tilde{\alpha}}_0|} < \delta_1\alpha = \frac{\overline{\Delta\alpha}}{|\alpha_0|}. \quad (8)$$

Очевидно, что аналогичным образом может быть введено понятие интервального вектора  $[a]$ , который состоит из интервальных скалярных компонентов, записываемого в форме:

$$[a] = \text{col}\{[a_i] | i = \overline{1, n}\}. \quad (9)$$

Интервальный вектор  $[a]$  по аналогии с (4) может быть представлен цепочкой равенств:

$$[a] = [\underline{a}, \overline{a}] = a_0 + [\Delta a] = a_0 + [\underline{\Delta a}, \overline{\Delta a}], \quad (10)$$

где  $a_0$  — медианный компонент интервального вектора  $[a]$ ,  $\underline{a}, \overline{a}$  — соответственно векторы, составленные из левых и правых граничных значений скалярных компонентов интервального вектора,  $[\Delta a]$  — центрированная относительно  $a_0$  интервальная составляющая интервального вектора  $[a]$ ,  $\underline{\Delta a}, \overline{\Delta a}$  — левое и правое граничные составляющие интервального вектора  $[a]$ . По аналогии с (5) оказываются справедливыми соотношения:

$$a_0 = 0.5[\underline{a} + \overline{a}], \quad \underline{\Delta a} = \underline{a} - a_0, \quad \overline{\Delta a} = \overline{a} - a_0, \quad \overline{\Delta a} = -\underline{\Delta a}. \quad (11)$$

Теперь по аналогии с (6) для интервального вектора может быть введено понятие оценки относительной интервальности нормы интервального вектора, задаваемой в форме:

$$\delta, a = \frac{\|\overline{\Delta a}\|}{\|a_0\|}. \quad (12)$$

С помощью выражения (12) можно, как и в скалярном случае, управлять относительной интервальностью нормы интервального вектора  $[a]$  путем изменения его медианного компонента  $a_0$ . Управление медианным компонентом интервального вектора в основном осуществляется в аддитивной форме. Пусть вектор  $\theta: \dim(\theta) = \dim([a])$  с фиксированными элементами таков, что выполняется условие:

$$\tilde{a}_0 = a_0 + \theta: \|\tilde{a}_0\| > \|a_0\|, \quad (13)$$

По существу введением аддитивного векторного компонента  $\theta$  осуществлено конструирование нового интервального вектора

$\tilde{a} = \tilde{a}_0 + [\Delta a]$ , обладающего меньшим значением оценки относительной интервальности его нормы так, что выполняется неравенство:

$$\delta_l \tilde{a} = \frac{\|\overline{\Delta a}\|}{\|\tilde{a}_0\|} < \delta_l a = \frac{\|\overline{\Delta a}\|}{\|a_0\|}. \quad (14)$$

Следует сказать, что авторами этот прием уменьшения относительной интервальности нормы интервального вектора использован в работе [16].

Аналогичным скалярному и векторному случаям может быть введено понятие интервальной матрицы  $[N]$ , которая состоит из интервальных скалярных компонентов  $[N_{ij}]$ , записываемая в форме:

$$[N] = \text{row}\{\text{col}([N_{ij}]; i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m})\}. \quad (15)$$

По аналогии с (4) для интервальной матрицы  $[N]$  может быть записана цепочка соотношений:

$$[N] = [\underline{N}, \overline{N}] = N_0 + [\Delta N] = N_0 + [\underline{\Delta N}, \overline{\Delta N}], \quad (16)$$

где  $N_0$  — медианная составляющая интервальной матрицы  $[N]$ ,  $\underline{N}, \overline{N}$  — матрицы, составленные из левых и правых граничных значений скалярных компонентов матрицы,  $[\Delta N]$  — центрированная относительно  $N_0$  интервальная составляющая интервальной матрицы  $[N]$ ,  $\underline{\Delta N}, \overline{\Delta N}$  — левое и правое граничные составляющие интервальные матрицы  $[N]$ . По аналогии с (5) оказываются справедливыми соотношения:

$$N_0 = 0.5[\underline{N} + \overline{N}], \quad \underline{\Delta N} = \underline{N} - N_0, \quad \overline{\Delta N} = \overline{N} - N_0, \quad \overline{\Delta N} = -\underline{\Delta N}. \quad (17)$$

Следует заметить, что квадратная матрица обладает тремя основными скалярными характеристиками: норма матрицы, след матрицы и определитель матрицы. Причем след матрицы [17] по определению равен сумме собственных чисел матрицы, а определитель равен произведению собственных чисел матрицы, при этом вычислительно след матрицы равняется сумме диагональных элементов матрицы.

Таким образом, по аналогии с (6) для матрицы  $[N]$  вводится понятие оценки относительной интервальности ее нормы, задаваемой в форме:

$$\delta_l N = \frac{\|\overline{\Delta N}\|}{\|N_0\|}. \quad (18)$$

В силу соотношения (18) можно, как и в скалярном случае, путем изменения ее медианной составляющей  $N_0$  управлять оценкой относительной интервальности нормы матрицы  $[N]$ . Очевидно, управление медианной составляющей, как и в скалярном случае, может быть осуществлено в двух формах. Действительно, пусть матрицы  $B$  и  $\Pi$  удовлетворяют соотношениям:

$$\tilde{N}_0 = N_0 B, \quad \tilde{\tilde{N}}_0 = N_0 + \Pi; \quad \|\tilde{N}_0\| > \|N_0\|, \quad \|\tilde{\tilde{N}}_0\| > \|N_0\|. \quad (19)$$

По существу, введением мультипликативного матричного компонента  $B$  или аддитивного матричного компонента  $\Pi$  конструируются новые интервальные матрицы  $\tilde{N} = \tilde{N}_0 + [\Delta N]$  и  $\tilde{\tilde{N}} = \tilde{\tilde{N}}_0 + [\Delta N]$ , обладающие меньшими значениями оценок относительной интервальности их норм, так что выполняются неравенства:

$$\delta_l \tilde{N} = \frac{\|\overline{\Delta N}\|}{\|\tilde{N}_0\|} < \delta_l N = \frac{\|\overline{\Delta N}\|}{\|N_0\|}; \quad \delta_l \tilde{\tilde{N}} = \frac{\|\overline{\Delta N}\|}{\|\tilde{\tilde{N}}_0\|} < \delta_l N = \frac{\|\overline{\Delta N}\|}{\|N_0\|}. \quad (20)$$

Если интервальная матрица  $[N]$  — квадратная ( $m = n$ ), то становится корректной постановка задачи оценки относительной интервальности интервального следа  $[tr([N])]$  этой матрицы:

$$[tr([N])] = \sum_{i=1}^n [\lambda_i([N])] = \sum_{i=1}^n [N_{ii}] = tr(N_0) + [tr([\Delta N])] \quad (21)$$

в форме:

$$\delta_l tr(N) = \frac{|tr(\overline{\Delta N})|}{|tr(N_0)|}. \quad (22)$$

Интервальными являются и собственные числа  $[\lambda_i]$  интервальной квадратной матрицы  $[N]$ , в силу определения удовлетворяющие условию

$[\lambda_i] = \arg\{det([\lambda_i]I - [N]) = 0\}$ . Если интервальное собственное число записать в приведенных выше формах, то получим по аналогии с [6] цепочку равенств  $[\lambda_i] = [\underline{\lambda}_i, \bar{\lambda}_i] = \lambda_{i0} + [\underline{\Delta\lambda}_i, \bar{\Delta\lambda}_i]$ . Используя интервальное представление собственных чисел интервальной матрицы, ее интервальный след можно записать в форме  $[tr(N)] = \sum_{i=1}^n [\lambda_i] = \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} + \left[ \sum_{i=1}^n \underline{\Delta\lambda}_i, \sum_{i=1}^n \bar{\Delta\lambda}_i \right]$ , что с использованием (22) позволяет для оценки относительной интервальности следа матрицы записать:

$$\delta_I tr(N) = \frac{|tr(\overline{\Delta N})|}{|tr(N_0)|} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \bar{\Delta\lambda}_i \right|}{\left| \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} \right|}. \quad (23)$$

Если интервальная квадратная матрица обладает спектром интервальных кратных собственных чисел так, что  $[\lambda_i] = [\underline{\lambda}_i, \bar{\lambda}_i] = \lambda_{i0} + [\underline{\Delta\lambda}_i, \bar{\Delta\lambda}_i] = [\lambda] = [\underline{\lambda}, \bar{\lambda}] = \lambda_0 + [\underline{\Delta\lambda}, \bar{\Delta\lambda}]$ ,  $(i = \overline{1, n})$ , то в силу (23) оценки относительной интервальности следа интервальной матрицы и интервального кратного собственного числа совпадают так, что выполняется равенство  $\delta_I tr(N) = \delta_I \lambda$ .

Соотношение (23), дополненное требованием выполнения условия  $tr(N_0) < 0$ , с использованием аддитивного способа изменения медианной составляющей матрицы состояния проектируемой системы путем использования обратной связи по вектору состояния, являются основой для формирования алгоритма синтеза робастной непрерывной системы на основе минимизации оценки относительной интервальности следа ее матрицы состояния в случае, когда параметрическая неопределенность компонентов модели технического объекта задана в интервальной форме. К этому надо добавить, что след матрицы состояния очень информативен, потому что он равен сумме ее собственных чисел, и очень конструктивен, потому что вычислительно он определяется как сумма диагональных элементов матрицы.

**4. Основной результат. Алгоритм синтеза медианного модального управления с использованием концепции управляемой относительной интервальности.** Модальное управление [18], используемое в данной работе, основано на концепции подобия матриц состояния проектируемой системы и модальной (эталонной) модели, которая



в алгоритме приводит к матричному уравнению Сильвестра с использованием медианной составляющей интервальной матрицы состояния технического объекта. Характеристическая частота [19] модальной модели (ММ) должна назначаться на основании требований к динамическим показателям системы и необходимого значения оценки относительной интервальности следа матрицы состояния системы, которая в решаемой задаче выступает в качестве критерия робастности, точнее модальной робастности. С учетом сказанного алгоритм принимает вид:

1. Сформулировать требования к показателям качества системы в переходном и установившемся режимах в форме неравенств:

$$\sigma_0 \leq \sigma_R, t_{\Pi 0} \leq t_{\Pi R}, D_{01} \geq D_{IR}, \delta_0 \leq \delta_R, \quad (24)$$

где  $\sigma_R$ ,  $t_{\Pi R}$ ,  $D_{IR}$ ,  $\delta_R$  — соответственно требуемые медианные значения перерегулирования, длительности переходного процесса, добротности по скорости и величины относительной частотной ошибки при гармоническом внешнем воздействии.

2. Задать требуемое значение  $\delta_{tr}(F)$  оценки  $\delta_{tr}(F)$  относительной интервальности следа интервальной матрицы  $[F]$  состояния проектируемой системы.

3. Задать модель исходного технического объекта в форме модели ВСВ (1).

4. Сформировать модель желаемого поведения проектируемой системы в форме модальной модели (ММ) с передаточной функцией (ПФ) «вход-выход» (ВВ) [19-22] вида:

$$\Phi(s, \omega_0) = \frac{v_n \omega_0^n}{s^n + \sum_{i=1}^n v_i \omega_0^i s^{n-i}} = \frac{v_n \omega_0^n}{D(s, v_i, \omega_0)}, \quad (25)$$

где коэффициенты  $v_i$  полинома  $D(s, v_i, \omega_0)$  определяют характер размещения его корней на комплексной плоскости,  $\omega_0$  — параметр, именуемый характеристической частотой, определяет размер области локализации этого размещения так, что задача синтеза оказывается однопараметрической и сводится к определению необходимого значения  $\omega_0$ , при этом от  $v_i$  зависят перерегулирование, показатель колебательности и запас устойчивости, а от  $\omega_0$  при фиксированных  $v_i$  зависят длительность переходного процесса, частота среза, добротность по скорости и ширина

полос пропускания на заданном уровне амплитудных частотных характеристик по выходу и ошибке. При этом, если по условиям задачи синтеза системы оказывается недопустимым ненулевое значение перерегулирования, следует использовать размещение Ньютона корней полинома  $D(s, v_i, \omega_0)$  знаменателя ПФ (25). В противном случае в качестве ПФ (25) может быть использована ее реализация с размещениями корней полинома знаменателя Баттерворта, Чебышева, Бессели и другие [20].

5. Определить значение характеристической частоты  $\omega_0$  из условия выполнения соотношения:

$$\omega_0 = \max \left\{ \begin{array}{l} \omega_0 = \arg(t_{\Pi}(\omega_0) \leq t_{\text{ПР}}), \\ \omega_0 = \arg(D(\omega_0) \geq D_{\text{R}}), \\ \omega_0 = \arg(\delta(\omega_0) \leq \delta_{\text{R}}) \end{array} \right\}. \quad (26)$$

6. Подставить значение характеристической частоты (26) в (25), после чего перейти от представления ВВ модальной модели к ее представлению ВСВ в векторно-матричной форме:

$$z(t) = \Gamma(\omega_0)z(t) + Eg(t), \eta = Hz(t), \quad (27)$$

где  $z, \eta$  — соответственно векторы состояния и выхода ММ;  $\Gamma, E, H$  — соответственно матрицы состояния, входа и выхода ММ, при этом  $(\Gamma, H)$  — наблюдаемая пара матриц. Перечисленные компоненты имеют размерности:  $\dim(z) = n, \quad \dim(y) = m, \quad \dim(\Gamma) = n \times n, \quad \dim(E) = \dim(C^T) = n \times m, \quad \dim(H) = \dim(B^T)$ .

7. Задать алгоритм формирования сигнала управления объектом (1) в форме (2):

8. Решить матричное уравнение Сильвестра [23]:

$$M\Gamma - A_0M = -BH, \quad (28)$$

относительно матрицы  $M$  матричного подобия  $M\Gamma = F_0M$ .

9. Осуществить вычисление матрицы  $K$  обратных связей с помощью [23] формулы:

$$K = HM^{-1}. \quad (29)$$

10. Сформировать медианную составляющую  $F_0$  интервальной матрицы  $[F] = F_0 + [\Delta F] = F_0 + [\Delta A]$  состояния проектируемой системы (3) на основании матричного условия подобия  $F_0 = MGM^{-1}$ .

11. Осуществить проверку выполнения условия достижения требуемого значения оценки относительной интервальности следа матрицы  $[F] = F_0 + [\Delta F] = F_0 + [\Delta A]$  на основании неравенства:

$$\delta_l tr(F) = \frac{|tr(\overline{\Delta A})|}{|tr(F_0)|} \leq \delta_{lr} tr(F). \quad (30)$$

В случае выполнения условий (24) и (30) перейти к п. 12 алгоритма, иначе — увеличить значение характеристической частоты  $\omega_0$  и перейти к п.6 алгоритма.

12. Вычислить матрицу  $K_g$  прямой связи с помощью соотношения:

$$K_g = \arg\left\{ \Phi(s) = C(sI - F_0)^{-1} BK_g \Big|_{s=0} = I \right\} = (C(-F_0)^{-1} B)^{-1}. \quad (31)$$

13. Отказаться от гипотезы о непосредственной измеримости внешнего воздействия  $g(t)$ , которая использована при построении алгоритма (2) формирования сигнала управления с тем, чтобы сформировать физически реализуемый алгоритм:

$$u(t) = K_e \varepsilon(t) - K_x x(t), \quad (32)$$

где  $K_x = K - K_y C$ ,  $K_e = K_y = K_g$ ,  $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$ .

14. Произвести исследование спроектированной робастной системы в оболочке Matlab и Simulink, особое внимание обратить на значения показателей системы при граничных значениях интервальных параметров исходного технического объекта.

15. В случае положительных результатов выполнения п.14 осуществить техническую реализацию спроектированной системы.

**5. Пример.** Проиллюстрируем предложенную авторами методику синтеза робастной непрерывной системе на примере разработки системы высокоточного следящего микроперемещения (СВСМ) элементов составного зеркала телескопа [23, 24]. Исполнительное устройство системы, выполненное в виде прецизионного пьезопривода (ППП) с усилителем мощности, описывается передаточной функцией «вход-выход»:

$$W_{ov}(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \cdot \frac{K_2}{T_2^2 s^2 + 2[\zeta] T_2 s + 1}, \quad (33)$$

с параметрами  $K_1 \cdot K_2 = 10^{-6}$  мм/в,  $T_1 = 5 \cdot 10^{-4}$  с,  $T_2^2 = 2.56 \cdot 10^{-8}$  с<sup>2</sup>, и интервальным коэффициентом демпфирования  $[\zeta]$ , который в силу (4) представим в форме  $[\zeta] = [0.05, 0.15] = \zeta_0 + [\Delta\zeta] = 0.1 + [-0.05, 0.05]$ .

В соответствии с разработанной авторами методикой, реализованной в форме алгоритма, приведенного в разделе «основной результат»:

1. Сформируем требования к показателям проектируемой робастной СВСМ: перерегулирование должно отсутствовать так, что должно выполняться условие  $\sigma_0 = 0\%$ ; длительность переходного процесса должна удовлетворять неравенству  $t_{п0} \leq 0.01$  с; значение добротности  $D_1$  по скорости обеспечить из условия  $D_{10} \geq 100c^{-1}$ ; величина относительной частотной ошибки  $\delta_0 = (\varepsilon_m / g_m)$  при воспроизведении с ошибкой  $\varepsilon(t) = \varepsilon_m \sin(\omega t + \psi)$  экзогенного гармонического воздействия  $g(t) = g_m \sin(\omega t)$  с параметрами  $g_m = 10^{-5}$  м,  $\omega = 3.14c^{-1}$  должна быть обеспечена из условия  $\delta_0 \leq 0.01$ ;

2. Сформируем требование к величине оценки относительной интервальности следа матрицы состояния проектируемой робастной СВСМ в форме неравенства  $\delta_{tr}(F) \leq 0.025$ .

3. На основании (33) сформируем представление ППП в форме (1) с использованием правил интервальной арифметики при переходе от интервальной модели ВВ к интервальной модели ВСВ [14], в результате чего получим:

$$[A] = A_0 + [\Delta A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -39000000 & -1250 & 1 \\ 0 & 0 & -2000 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & [-625; 625] & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 78125 \end{bmatrix}; C = [1 \ 0 \ 0]. \text{ При этом } \delta_{tr}(A) = \frac{625}{3250} = 0.1923.$$

4. В силу того, что ППП представляет собой технический объект размерности  $n = 3$  зададим ПФ (25) проектируемой робастной СВСМ в форме:

$$\Phi(s, \omega_0) = \frac{v_3 \omega_0^3}{s^3 + \sum_{i=1}^3 v_i \omega_0^i s^{3-i}} = \frac{v_3 \omega_0^3}{D(s, v_i, \omega_0)} = \frac{v_3 \omega_0^3}{s^3 + v_1 \omega_0 s^2 + v_2 \omega_0^2 s + v_3 \omega_0^3}. \quad (34)$$

5. В силу требования к величине перерегулирования в форме равенства  $\sigma_0 = 0\%$  назначаем размещение Ньютона корней полинома  $D(s, v_i, \omega_0) = s^3 + v_1 \omega_0 s^2 + v_2 \omega_0^2 s + v_3 \omega_0^3$  по таблицам [19] показателей качества типовых полиномиальных динамических моделей с размещением Ньютона корней определяем значение характеристической частоты  $\omega_0$  из условия (26), в результате чего получаем:

$$\omega_0 = \max \left\{ \begin{array}{l} \omega_0 = \arg(t_n(\omega_0) \leq 0.01 c) = 630, \\ \omega_0 = \arg(D_1(\omega_0) \geq 100 c^{-1}) = 300, \\ \omega_0 = \arg(\delta_0(\omega_0) \leq 0.01) = 942 \end{array} \right\} = 942 c^{-1}.$$

6–11. Выполнение этих пунктов при значении характеристической частоты  $\omega_0 = 942 c^{-1}$  обнаруживает невыполнение условия  $\delta_{tr}(F) \leq 0.025$ , что в силу алгоритма синтеза робастной непрерывной системы требует осуществить увеличения  $\omega_0$ , в рассматриваемом случае оно оказалось значительным, так что  $\omega_0$  придано значение  $\omega_0 = 9420 c^{-1}$ , при этом в силу алгоритма осуществлено возвращение к его п.б.

6. При значении характеристической частоты  $\omega_0 = 9420 c^{-1}$  передаточная функция (34) проектируемой робастной СВСМ принимает представление  $\Phi(s, \omega_0) = \frac{9420^3}{s^3 + 3 \cdot 9420 s^2 + 3 \cdot 9420^2 s + 9420^3}$ , что дает матричные компоненты ММ (27):

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -9420^3 & -3 \cdot 9420^2 & -3 \cdot 9420 \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9420^3 \end{bmatrix}; H = [1 \ 0 \ 0]. \quad (35)$$

7. Получим решение матричного уравнения Сильвестра (27) с матричными компонентами (35):

$$M = \begin{bmatrix} 7.63 \cdot 10^{-7} & 1.17 \cdot 10^{-10} & 4.81 \cdot 10^{-15} \\ -0.004 & -5.18 \cdot 10^{-7} & -1.93 \cdot 10^{-11} \\ 40.8659 & 0.005 & 1.91 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix},$$

что позволяет вычислить матрицу отрицательной обратной связи по состоянию  $K = HM^{-1} = [-2.7839 \cdot 10^6 \ 0.2476 \ 0.3201]$ .

8. С использованием матрицы  $M$  решения матричного уравнения Сильвестра в п.7 на основании соотношения подобия  $F_0 = MGM^{-1}$  формируем медианную составляющую интервальной матрицы состояния проектируемой робастной СВСМ

$$F_0 = \begin{bmatrix} 539.4144 & 1.339 & 2 \cdot 10^{-5} \\ -4.0741 \cdot 10^7 & -4452 & 0.7196 \\ 1.9695 \cdot 10^{11} & -1.7126 \cdot 10^8 & -24347 \end{bmatrix}.$$

9. Вычисляем след матрицы  $F_0$  с тем, чтобы проверить выполнение условия робастности  $\delta_l tr(F) = \frac{|tr(\overline{\Delta A})|}{|tr(F_0)|} \leq \delta_{IR} tr(F) = 0.025$ , которое оказывается выполненным в силу соотношений:

$$\delta_l tr(F) = \frac{|tr(\overline{\Delta A})|}{|tr(F_0)|} = \frac{625}{28260} = 0.022 < 0.025,$$

что оказалось меньше относительной интервальности  $\delta_l tr(A) = 0.1923$  следа интервальной матрицы состояния исходного технического объекта в 8.74 раза.

10,11. Значение матрицы  $K_g$  прямых связей, которая в решаемой задаче оказалась скаляром, вычисляем с помощью соотношения (31), в результате чего получаем  $K_g = 1.0054 \cdot 10^7$ ; кладем  $K_e = K_g$  с тем чтобы реализовать закон управления исполнительной частью, проектируемой робастной СВСМ в физически реализуемой форме (32).

12. Проводим комплексное исследование спроектированной робастной СВСМ с использованием оболочки Simulink пакета Matlab, результаты которого представлены на рисунках 1, 2, 3 и 4 в виде кривых: переходного процесса при воспроизведении ступенчатого входного воздействия  $g(t) = g_0 \cdot 1(t)$ ,  $g_0 = 10^{-5}$  м, при воспроизведении кинетического входного воздействия, изменяющегося с постоянной скоростью  $g(t) = \dot{g}_0 t$ ,  $\dot{g}_0 = 3.14 \cdot 10^{-5}$  м/с и ошибки при воспроизведении системой гармонического воздействия с амплитудой  $g_m = 10^{-5}$  м, и частотой  $\omega = 3.14 c^{-1}$ , что позволяет зафиксировать следующие динамические показатели спроектированной робастной СВСМ  $\sigma_0 = 0\%$ ,

$t_{i_0} = 0.0007 \text{ c} \leq 0.01 \text{ c}$  и  $D_{i_0} = 3.14 \cdot 10^{-5} / 10^{-8} = 3140 \text{ c}^{-1} > 100 \text{ c}^{-1}$ ,  
 $\delta_0 = \varepsilon_{m_3} / g_{m_3} = 10^{-8} / 10^{-5} = 0.001$ . Достигнутая робастность хорошо иллюстрируется кривыми переходного процесса для случаев медианной и двух угловых реализаций матрицы состояния системы.

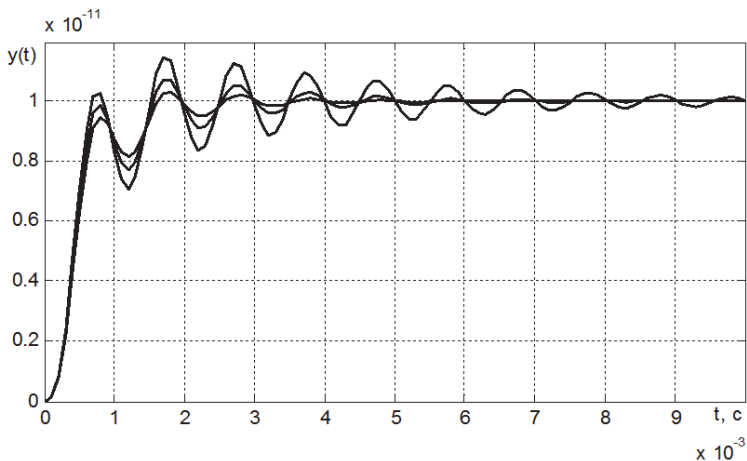


Рис.1. Кривые переходных характеристик исходного устойчивого технического объекта в виде ППП при медианном и двух угловых значениях интервального параметра

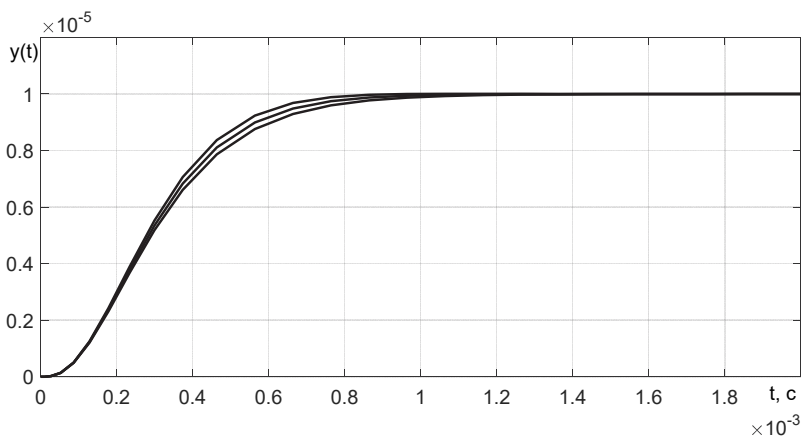


Рис.2. Кривые переходных характеристик спроектированной робастной СВСМ при медианном и двух угловых значениях интервального параметра исходного технического объекта

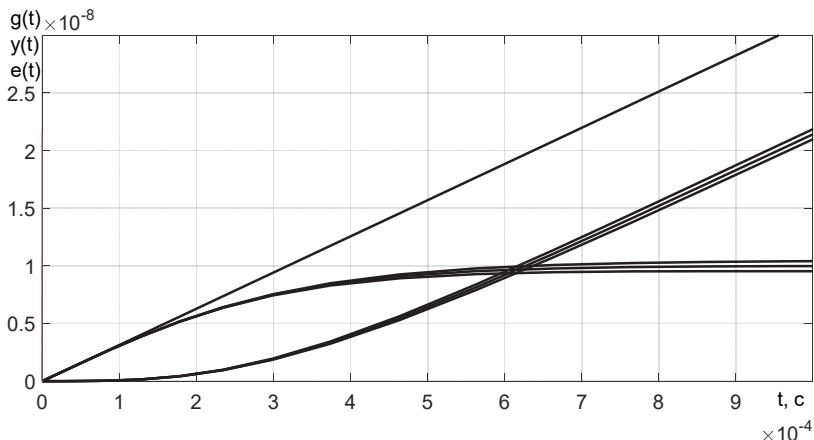


Рис. 3. Кривая кинетического входного воздействия (1), семейство кривых выхода (2) и семейство кривых ошибки (3) спроектированной робастной СВСМ при медианном и двух угловых значениях интервального параметра технического объекта

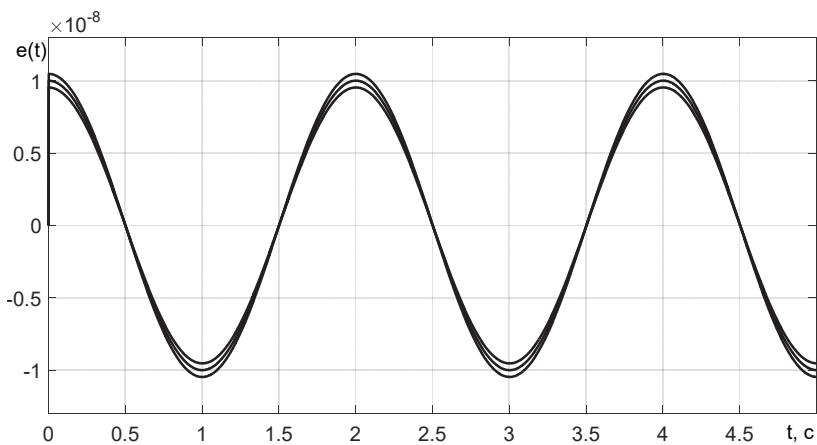


Рис.4. Кривые ошибки спроектированной робастной СВСМ при воспроизведении гармонического воздействия

**6. Заключение.** Получен алгоритм синтеза устройства управления непрерывным техническим объектом с неопределенными параметрами, заданными в интервальной форме, доставляющего системе параметрическую робастность. Применение метода медианного модального управления в сочетании с процедурой минимизации значения оценки относительной интервальности следа матрицы состояния проектируе-



мой системы обеспечивает требуемые значения относительной интервальности интервальных значений стандартных показателей качества разработанной системы. Действительно, в приведенном примере уменьшение оценки относительной интервальности следа интервальной матрицы состояния спроектированной системы по сравнению с оценкой относительной интервальности следа интервальной матрицы состояния исходного технического объекта в 8.74 раза, как следует из анализа кривых рисунка 1 и рисунка 2, дает сокращение нормы дополнительного движения в относительном представлении в 7.3 раза.

### Литература

1. *Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М.* Чувствительность систем управления // М.: Наука. 1981. 464 с.
2. *Никифоров В.О., Ушаков А.В.* Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность // СПб.:СПбГИТМО(ТУ). 2002. 232 с.
3. *Petersen I.R., Tempo R.* Robust control of uncertain systems: Classical results and recent developments // Automatica. 2014. vol. 50. no. 5. pp. 1315–1335.
4. *Wonham W.M.* Linear Multivariable Control: A Geometric Approach // New York: Springer. 1974. 344 p.
5. *Cloutier J.R.* Robust control of uncertain dynamic systems: A linear state space approach // Springer New York. 2014. 204 p.
6. *Ackermann J.* Robust control systems with uncertain physical parameters // London: Springer-Verlag. 1993. 406 p.
7. *Oliveira V.A., Felizardo K.R., Bhattacharyya S.P.* A model-free measurement based approach to circuit analysis and synthesis based on linear interval systems // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2015. pp. 38–43.
8. *Matusiū R.* Robust stabilization of interval plants by means of two feedback controllers // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. 2015. vol. 9. pp. 427–434.
9. *Junior F.S., Oliveira J., Araújo A.* Variable structure adaptive pole placement control for uncertain systems: An interval approach // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 2017. vol. 13. pp. 485–507.
10. *Mohsenzadeh D.N., Oliveira V.A., Keel L.H., Bhattacharyya S.P.* Extremal results for algebraic linear interval systems // Springer Optimization and Its Applications. 2016. vol. 115. pp. 341–351.
11. *Mohsenzadeh D.N., Keel L.H., Bhattacharyya S.P.* An extremal result for unknown interval linear systems // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2014. vol. 19. pp. 6502–6507.
12. *Patre B.M., Deore P.J.* Robust state feedback for interval systems: An interval analysis approach // Reliable Computing. 2010. vol. 14. pp. 46–60.
13. *Yedavalli R.K.* Robust stability of linear interval parameter matrix family problem revisited with accurate representation and solution // Proceedings of the American Control Conference. 2009. pp. 3710–3717.
14. *Moore R.E., Kearfott R.B., Cloud M.J.* Introduction to Interval Analysis // SIAM Philadelphia. 2009. 234 p.
15. *Ackermann J.* Parameter Space Design of Robust Control Systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1980. vol. 25 no.6. pp. 1058–1072.
16. *Акунов Т.А. и др.* Задача качественного исследования харитоновской робастной устойчивости непрерывных систем // Международный научно-технический журнал “Проблемы управления и информатики”. 2016. № 4. С. 100–108.

17. *Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А.* Матрицы и вычисления // М.: Наука. 1984. 320 с.
18. *Smagina Ye., Brewer I.* Using interval arithmetic for robust state feedback design // *Systems and Control Letters*. 2002. vol. 46. no. 3. pp. 187–194.
19. *Быстров С.В., Вундер Н.А., Синетова М.М., Ушаков А.В.* Аналитическое конструирование последовательного компенсатора для систем с запаздыванием на основе модификации типовых полиномиальных моделей // *Труды СПИИРАН*. 2017. Вып. 3(52). С. 115–136.
20. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход) // М.: Физматлит. 2012. 360 с.
21. *Быстров С.В., Вундер Н.А., Ушаков А.В.* Решение проблемы сигнальной неопределенности при аналитическом конструировании последовательного компенсатора в задаче управления пьезоприводом // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 3. С. 451–459.
22. *Barmish B.R., Hollot C.V., Kraus F.J., Tempo R.* Extreme Point Results for Robust Stabilization of Interval Plants with First Order Compensators // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1992. vol. 37 no. 6. pp. 707–714.
23. *Быстров С.В., Слита О.В., Сударчиков С. А., Ушаков А. В.* Обеспечение робастности пьезопривода с использованием метода управляемой относительной интервальности // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 7. С.534–541.
24. *Артемченко Ю.Н. и др.* Особенности выбора электроприводов зеркальной системы космических радиотелескопов // *Мехатроника, Автоматизация, Управление*. 2012. №1. С. 26–31.

**Александрова Софья Александровна** — аспирант кафедры систем управления и информатики, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). Область научных интересов: управляемый электропривод, проблемы обеспечения робастности непрерывных систем с техническими объектами с интервальными параметрами. Число научных публикаций — 15. alexandrova\_sophie@mail.ru; Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101; р.т.: +7(812) 595-41-28.

**Быстров Сергей Владимирович** — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры систем управления и информатики, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). Область научных интересов: системы управления с исполнительными устройствами на пьезокерамике, синтез последовательных компенсаторов в условиях сигнальной и параметрической неопределенности. Число научных публикаций — 68. sbystrov@mail.ru; Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101; р.т.: +7(812)595-41-28.

**Вундер Нина Александровна** — аспирант кафедры систем управления и информатики, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). Область научных интересов: матричный формализм метода пространства состояния, разработка устройств управления в форме последовательного компенсатора, системы с неопределенностями и запаздыванием, анализ причинных факторов больших отклонений свободного движения линейных устойчивых непрерывных и дискретных систем. Число научных публикаций — 43. polinova\_nina@mail.ru; Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101; р.т.: +7(812)595-41-28.

**Слита Ольга Валерьевна** — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры систем управления и информатики, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). Область научных

интересов: проблемы робастности в условиях параметрической неопределенности, заданной аддитивным и интервальным образом, разработка алгоритмов синтеза параметрически инвариантных сист. Число научных публикаций — 53. o-slita@yandex.ru; Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101; р.т.: +7(812) 595-41-28.

**Ушаков Анатолий Владимирович** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем управления и информатики, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). Область научных интересов: проблемы динамики непрерывных, дискретных и двоичных динамических систем, робастность непрерывных систем с интервальными и аддитивными параметрическими неопределенностями, системы с запаздыванием, разработка возможностей обобщенного модального управления, аппарат эллипсоидных оценок качества векторных процессов в многомерных системах, разработка цифрового дистанционного управления непрерывными объектами с учетом факторов канальной среды, проблемы человека-оператора, интегрированного в функциональную среду. Число научных публикаций — 360. Ushakov-AVG@yandex.ru; Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101; р.т.: +7(812)595-41-28.

**Поддержка исследований.** Работа написана при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, госзадание № 8.8885.2017/8.9

S.A. ALEXANDROVA, S.V. BYSTROV, N.A. VUNDER, O.V. SLITA,  
A.V. USHAKOV

**CONTINUOUS ROBUST SYSTEM SYNTHESIS BASED ON  
MINIMIZATION OF ESTIMATION OF THE RELATIVE  
INTERVALITY OF TRACE OF THE STATE MATRIX**

---

*Alexandrova S.A., Bystrov S.V., Vunder N.A., Slita O.V., Ushakov A.V.* **Continuous Robust System Synthesis Based on Minimization of Estimation of the Relative Intervality of Trace of the State Matrix.**

**Abstract.** An algorithm for synthesis of robust control system for a continuous plant with uncertain interval parameters is proposed in the paper. A concept of relative intervality of the following interval mathematical objects is used to ensure robustness of the system: a scalar, a vector, a numerical characteristic of matrix namely trace. The problem is solved by the median modal control method taking into account the relative intervality of trace of the system state matrix. The trace of a matrix is the sum of the eigenvalues. The desired relative intervality value of standard system indicators is guaranteed. It is shown that relative intervality of trace of the system state matrix is equal to relative intervality of trace of multiply eigenvalue when the state matrix has one multiple eigenvalue. Relative intervality of trace of the system state matrix is changed by changing its median component. It is realized by introducing feedback on the plant state vector. The obtained results are illustrated by an example.

**Keywords:** interval parameters, relative intervality, trace of matrix, estimation, median modal control, robustness.

---

**Alexandrova Sofija Aleksandrovna** — Ph.D. student of control systems and informatics department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: controlled electric drive, robustness of continuous systems with interval plant. The number of publications — 15. alexandrova\_sophie@mail.ru; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +7(812) 595-41-28.

**Bystrov Sergey Vladimirovich** — Ph.D., associate professor, associate professor of control systems and informatics department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: control systems on piezoceramic actuators, consecutive compensator synthesis under conditions of signal and parametric uncertainty. The number of publications — 68. sbystrov@mail.ru; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +7(812)595-41-28.

**Vunder Nina Aleksandrovna** — Ph.D. student of control systems and informatics department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: state space method, consecutive compensator synthesis, control systems with uncertainties and delay, peaks of free motion of linear stable continuous and discrete systems. The number of publications — 43. polinova\_nina@mail.ru; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +7(812)595-41-28.

**Slita Olga Valer'evna** — Ph.D., associate professor, associate professor of control systems and informatics department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: problems of robustness un-

der conditions of parametric uncertainty given by additive and interval forms, synthesis of parametrically invariant systems. The number of publications — 53. o-slitaa@yandex.ru; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +7(812) 595-41-28.

**Ushakov Anatoly Vladimirovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of control systems and informatics department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: : problems of the dynamics of continuous, discrete and binary dynamic systems, robustness of continuous systems with interval and additive parametric uncertainties, delayed systems, the development of the possibilities of generalized modal control, the apparatus of ellipsoidal estimations of the quality of vector processes in multidimensional systems, the development of digital remote control of continuous plants with allowance for the channel environment, the problem of the human operator, integrated into the functional environment. The number of publications — 360. Ushakov-AVG@yandex.ru; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +7(812)595-41-28.

**Acknowledgements.** This work was supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation, goszadanie no. 8.8885.2017/8.9

## References

1. Rosenwasser E.N., Jusupov R.M. *Chuvstvitel'nost' sistem upravleniya* [Sensitivity of control systems]. M.: Nauka. 1981. 464 p. (In Russ).
2. Nikiforov V.O., Ushakov A.V. *Upravlenie v usloviyah neopredelennosti: chuvstvitel'nost', adaptaciya, robnost'* [Control under uncertainty: sensitivity, adaptation, robustness]. SPb.:SPbGITMO(TU). 2002. 232 p. (In Russ).
3. Petersen I.R., Tempo R. Robust control of uncertain systems: Classical results and recent developments. *Automatica*. 2014. vol. 50. no. 5. pp. 1315–1335.
4. Wonham W.M. *Linear Multivariable Control: A Geometric Approach*. New York: Springer. 1974. 344 p.
5. Cloutier J.R. *Robust control of uncertain dynamic systems: A linear state space approach*. Springer New York. 2014. 204 p.
6. Ackermann J. *Robust control systems with uncertain physical parameters*. London: Springer-Verlag. 1993. 406 p.
7. Oliveira V.A., Felizardo K.R., Bhattacharyya S.P. A model-free measurement based approach to circuit analysis and synthesis based on linear interval systems. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2015. pp. 38–43.
8. Matuš R. Robust stabilization of interval plants by means of two feedback controllers. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2015. vol. 9. pp. 427–434.
9. Junior F.S., Oliveira J., Araújo A. Variable structure adaptive pole placement control for uncertain systems: An interval approach. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 2017. vol. 13. pp. 485–507.
10. Mohsenizadeh D.N., Oliveira V.A., Keel L.H., Bhattacharyya S.P. Extremal results for algebraic linear interval systems. *Springer Optimization and Its Applications*. 2016. vol. 115. pp. 341–351.
11. Mohsenizadeh D.N., Keel L.H., Bhattacharyya S.P. An extremal result for unknown interval linear systems. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 2014. vol. 19. pp. 6502–6507.
12. Patre B.M., Deore P.J. Robust state feedback for interval systems: An interval analysis approach. *Reliable Computing*. 2010. vol. 14. pp. 46–60.

13. Yedavalli R.K. Robust stability of linear interval parameter matrix family problem revisited with accurate representation and solution. Proceedings of the American Control Conference. 2009. pp. 3710–3717.
14. Moore R.E., Kearfott R.B., Cloud M.J. Introduction to Interval Analysis. SIAM Philadelphia. 2009. 234 p.
15. Ackermann J. Parameter Space Design of Robust Control Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1980. vol. 25 no.6. pp. 1058–1072.
16. Akunov T.A. et al. [The problem of qualitative research of the Khariton robust stability of continuous systems] *Mezhdunarodnyj nauchno–tehnicheskij zhurnal “Problemy upravlenija i informatiki” – International scientific and technical journal “Problems of Control and Informatics”*. 2016. vol. 4. pp. 100–108. (In Russ).
17. Voevodin V.V., Kuznecov Ju.A. *Matricy i vychislenija* [Matrices and calculations]. M.: Nauka. 1984. 320 p. (In Russ).
18. Smagina Ye., Brewer I. Using interval arithmetic for robust state feedback design. *Systems and Control Letters*. 2002. vol. 46. no. 3. pp. 187–194.
19. Bystrov S.V., Vunder N.A., Sinetova M.M., Ushakov A.V. [Analytical Design of Consecutive Compensator for Control Systems With Delay Based on Modification of Typical Polynomial Models]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. vol. 3(52). pp. 115–136.
20. Gajduk A.R. *Teorija i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravlenija (polynomial'nyj podhod)* [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. M.: Fizmatlit. 2012. 360 p. (In Russ).
21. Bystrov S.V., Vunder N.A., Ushakov A.V. [Solution of signal uncertainty problem at analytical design of consecutive compensator in piezo actuator control]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2016. vol. 16. no. 3. pp. 451–459 (In Russ).
22. Barmish B.R., Hollot C.V., Kraus F.J., Tempo R. Extreme Point Results for Robust Stabilization of Interval Plants with First Order Compensators. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1992. vol. 37 no. 6. pp. 707–714.
23. Bystrov S.V., Slita O.V., Sudarchikov S.A., Ushakov A.V. [Ensuring piezoelectric drive robustness using the method of controlled relative interval frequency]. *Izv. vuzov. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2016. vol. 59. no. 7. pp. 534–541. (In Russ).
24. Artemenko Ju.N. et al. [Problems of the Choice of Electric Drives of Space Radio-Telescope System Dish System]. *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*. 2012. vol. 1. pp. 26–31. (In Russ).

В.А. ЗЕЛЕНЦОВ, С.А. ПОТРЯСАЕВ  
**АРХИТЕКТУРА И ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ И  
ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ СЕРВИСОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

---

*Зеленцов В.А., Потрысаев С.А. Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли.*

**Аннотация.** В статье описаны основы построения и примеры практической реализации систем (платформ) для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Принципиальными особенностями таких систем должны являться, во-первых, возможность интеграции территориально распределенных информационных ресурсов, включающих разнородные наземно-космические данные и расчетно-аналитические модули; во-вторых, максимально полная автоматизация этих процессов, обеспечивающая взаимодействие с неподготовленным (в смысле информационных технологий) пользователем. Показано, что базовым подходом для создания таких систем может являться сервис-ориентированная архитектура. На основе сравнительного анализа существующих и перспективных информационных технологий проведен выбор необходимого состава компонентов информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов (ИПТС). Конструктивность и реализуемость предложенного подхода демонстрируется на примерах практической апробации ИПТС при создании тематических сервисов.

**Ключевые слова:** данные дистанционного зондирования Земли, информационная платформа, тематический сервис, сервис-ориентированная архитектура, междисциплинарность.

---

**1. Введение.** В настоящее время одной из существенных проблем, связанных с развитием космической деятельности, является разрыв между нарастающими объемами данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и их реальным использованием для решения задач мониторинга и управления развитием территорий. Управление развитием территорий — это сфера целенаправленной деятельности специалистов в области государственного и муниципального управления по обеспечению устойчивого и сбалансированного воспроизводства социального, хозяйственного и природного потенциалов территории, направленная прежде всего на повышение уровня жизни населения. Успех в этой деятельности определяется в значительной степени наличием и возможностью использования объективных данных о состоянии природных и природно-технологических объектов, находящихся в сфере ответственности соответствующих специалистов и руководителей. В этом смысле данные ДЗЗ могут являться ценным

источником необходимой для управления информации, однако до настоящего времени, как отмечается на многочисленных форумах по обсуждению данной проблематики, они таким источником не стали.

К числу основных причин имеющегося разрыва относится недостаточный уровень созданных к настоящему времени информационно-аналитических систем (платформ), которые могли бы обеспечивать разработку и предоставление продуктов и услуг, основанных на использовании данных ДЗЗ, для государственного и муниципального управления. Существующие в РФ и за рубежом (в том числе и находящиеся на сегодняшний день в разработке системы) [1-10], как правило, отличаются перегруженностью пользовательских интерфейсов, ориентированы на интерактивный или ручной режим работы и требуют высокой специальной квалификации пользователей для подбора, обработки необходимых данных, моделирования, и интерпретации результатов. Такие требования являются явно избыточными, когда речь идет о специалистах-практиках, принимающих оперативные решения по управлению, в том числе и в условиях дефицита времени в чрезвычайных ситуациях.

Снижение требований к пользователю означает, прежде всего, необходимость максимально полной автоматизации обработки данных и предоставления результатов обработки в виде тематических сервисов. Под тематическим сервисом понимается веб-сервис, обеспечивающий интегрированную обработку данных ДЗЗ и других пространственных и непространственных данных, выполненную в соответствии с алгоритмом решения конкретной тематической задачи, и предоставление результатов пользователю. Примерами тематических сервисов являются: выявление изменений на территории, прогноз наводнений, определение степени загрязнения водоема, выявление неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения и другие [11]. Необходимо отметить, что в данной статье проводится анализ состояния вопроса именно применительно к управлению территориальным развитием, и не затрагиваются многочисленные направления разработок сервисов в области метеорологии, океанологии, анализа состояния атмосферы и других, где также активно используются данные ДЗЗ, но требования к пользователям и уровню автоматизации обработки данных и интерпретации результатов могут существенно отличаться от рассматриваемых.

Разработка тематических сервисов для управления развитием территорий является комплексной задачей и предполагает совместное, интегрированное использование данных ДЗЗ, а также результатов наземных измерений, расчетно-аналитических и прогнозных моделей,



средств визуализации результатов и других. Создание каждого такого сервиса, интегрирующего разнородные, и, как правило, территориально распределенные информационные ресурсы — это, по сути, выполнение междисциплинарного проекта, требующего привлечения разработок из целого спектра научно-технологических областей.

Ключевыми проблемами здесь являются, во-первых, необходимость создания теоретической базы для автоматического (интеллектуального) выбора типов и настройки параметров разнородных моделей, необходимых для решения каждой конкретной задачи по управлению развитием территорий; во-вторых, обоснование архитектуры информационных систем и состава технологий, необходимых для реализации всего комплекса требований к формированию и предоставлению тематических сервисов. Первая из данных проблем решается в рамках активно развиваемого в настоящее время научного направления — квалитетрии моделей и полимодельных комплексов [12, 13]. В неразрывной связи с этим направлением в СПИИРАН развиваются и информационные технологии для создания и функционирования систем, обеспечивающих реализацию полного цикла работ по формированию сервисов в максимально автоматизированном режиме, включая заказ, получение, обработку разнородных данных, моделирование и предоставление результатов пользователю. Именно этому направлению посвящена данная статья.

В настоящее время отечественные [1-3] и зарубежные [4-10] поставщики сервисов на базе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предлагают широкую номенклатуру тематических продуктов для работы с наборами пространственных данных, которые формируются на основе ручного или автоматизированного дешифрирования космоснимков специалистами. При этом динамически создаваемые данные в основном представляют собой геопривязанный документооборот (как с ручной привязкой, так и на основе ГЛОНАСС/GPS мониторинга). При необходимости интеграции с вспомогательными данными, сторонними информационными и информационно-аналитическими ресурсами, эта работа производится также в ручном либо полуавтоматическом режиме для каждой конкретной задачи потребителя. Такая технология предполагает достаточно высокую квалификацию пользователей в области ГИС и обработки ДЗЗ и не обеспечивает реализацию в автоматическом (или максимально автоматизированном) режиме полного цикла обработки данных и моделирования, необходимого для поддержки принятия решений по управлению развитием территорий. Кроме того, нерешенной остается проблема отчуждения программной реализации

моделей в той или иной предметной области от разработчиков при необходимости включения этих моделей в контур решения тематической задачи для управления, поскольку при существующих подходах требуется локализация необходимых моделей на рабочем месте соответствующего специалиста, который формирует полный цикл работы с данными ДЗЗ. То же касается и источников вспомогательных данных, в частности, результатов наземных измерений, которые, как правило, локализованы в конкретных административно-территориальных образованиях либо отраслевых организациях по профилю решаемых задач.

В рассматриваемом в данной статье подходе основной акцент сделан на формировании автоматических процессов полного цикла — от заказа данных ДЗЗ до предоставления конечного результата пользователю. При этом каждый из участвующих в процессе обработки данных информационно-аналитических ресурсов может оставаться на своем месте локализации без физического перемещения на рабочее место «решателя» конкретной задачи.

Необходимо отметить, что наиболее близкими по замыслу к данным технологиям являются разрабатываемые под управлением Европейского космического агентства информационные платформы под общим названием Thematic Exploitation Platforms (TEPs) [14]. Однако и в них, судя по имеющимся на сегодняшний день прототипам, предполагается активное привлечение квалифицированного специалиста предметной области для получения конечного результата.

**2. Функции информационной платформы.** Как уже отмечалось, информационное обеспечение поддержки принятия решений по управлению развитием территорий требует не только поставки данных ДЗЗ, но и создания высокоуровневых сервисов для оценивания динамики развития территории, прогнозирования изменения параметров состояния природно-технологических объектов, а также организации информационно-технологического взаимодействия с информационно-аналитическими системами (ИАС) отраслей и органов власти.

В целом проведенный авторами при выполнении ряда прикладных проектов анализ [11] показал, что информационная платформа для создания тематических сервисов (ИПТС) при своем функционировании должна обеспечивать решение задач:

– обобщенного анализа на уровне территориально-административного образования и автоматизированного формирования требований к составу и характеристикам данных ДЗЗ, необходимых для решения задач управления;

- формирования заказа данных ДЗЗ в соответствии с заданными потребителями требованиями по предоставлению сервисов и поставке тематических продуктов;
- информационно-технологического взаимодействия с поставщиками данных ДЗЗ в ходе заказа и предоставления данных;
- интеграции данных ДЗЗ с необходимыми информационно-аналитическими ресурсами (базами данных наземных измерений, расчетно-аналитическими модулями, сторонними информационными системами без ограничения территориальной удаленности и принадлежности);
- информационно-технологического взаимодействия с ИАС органов власти, а также необходимыми отраслевыми информационными системами;
- взаимодействия с конечными пользователями при заказе и предоставлении сервисов и тематических продуктов, разрабатываемых с использованием данных ДЗЗ;
- формирования банка геоинформационных и тематических продуктов, созданных с использованием данных ДЗЗ;
- информационно-технологического взаимодействия с внешними системами мониторинга и предоставления ДДЗЗ.

**3. Выбор типа архитектуры ИПТС.** Перечисленные функции ИПТС формируют требования к архитектуре программного комплекса, основными из которых, как следует из данного перечня, являются способность интеграции разнородных территориально распределенных информационных ресурсов при создании и функционировании тематических сервисов, максимально полная автоматизация этих процессов и возможность развития и наращивания функциональных возможностей ИПТС при появлении новых перспективных технологий взаимодействия информационных систем и обработки данных.

К настоящему времени известны следующие основные подходы к созданию систем подобного назначения [15]:

- монолитная архитектура;
- модульная архитектура;
- компонентная архитектура;
- клиент-серверная архитектура;
- сервис-ориентированная архитектура.

Широко распространенные приложения с монолитной архитектурой [16, 17] просты в реализации, управлении и развертывании, обеспечивают высокую согласованность программного кода, явное управление вычислительным процессом и единый контроль ошибок. Но

данный тип архитектуры актуален для небольших информационных систем, локализованных на одном вычислительном ресурсе.

Для более сложных программных комплексов применяется модульная архитектура [16, 18]. Лежащая в ее основе декомпозиция приложения упрощает процесс разработки, обслуживания и последующей модернизации комплексов. Развитие модульной архитектуры привело к появлению понятия «плагин» — независимо компилируемый программный модуль, динамически подключаемый к основной программе и предназначенный для расширения ее функциональности. Аналогичный подход используется в компонентной архитектуре [19], которая позволяет строить более сложные информационные системы за счет использования отлаженных «строительных блоков» программного кода. Основная идея компонентного подхода — повторное использование кода. В рамках этой архитектуры предъявляются повышенные требования к универсальности подключаемых модулей. Итогом развития компонентной архитектуры стало появление программных библиотек с широким набором универсальных функций. Однако компонентная архитектура, как и монолитная, предназначена для построения локализованных программных комплексов.

Основная особенность рассматриваемой ИПТС состоит в необходимости сопряжения ряда независимо разработанных территориально распределенных разнородных программных комплексов обработки, каталогизации, архивирования, хранения данных ДЗЗ и соответствующих информационных продуктов, региональных информационно-аналитических систем поддержки принятия решений при управлении развитием территорий, и так далее. То есть главным вопросом является не столько способы декомпозиции приложения, сколько способ организации взаимодействия разнородных модулей через информационно-коммуникационные сети. Основы сетевого взаимодействия модулей программного обеспечения были заложены в клиент-серверной архитектуре [20]. В узком смысле в качестве компонентов этой архитектуры рассматриваются пользовательский клиент, реализующий основную логику работы, и серверная часть, представленная СУБД или файл-сервером. В широком смысле клиент-серверная архитектура описывает любое взаимодействие двух и более распределенных программных модулей. Однако наиболее полно такое взаимодействие воплощено в идеологии сервис-ориентированной архитектуры (Service Oriented Architecture).

Сервис-ориентированная архитектура (COA) реализует модульный подход к разработке программного обеспечения, основанный на использовании распределенных, слабо связанных

заменяемых компонентов, оснащенных стандартизированными интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам [21]. Данный подход предназначается для построения сложных распределенных информационных систем на базе интеграции веб-сервисов. При этом интеграция осуществляется на уровне протоколов без понимания обеими взаимодействующими сторонами внутреннего устройства другой стороны. Это обеспечивает так называемую слабую связность модулей (веб-сервисов). Использование сервисов позволяет обеспечивать логическое разделение приложения на модули за счет явного физического разделения по аппаратным средствам (серверам). Благодаря этому становится возможным использование разных языков программирования, инструментов взаимодействия, мониторинга и хранения данных, что позволяет оптимизировать инфраструктуру ИПТС путем подбора лучшего программно-аппаратного решения для каждого конкретного сервиса.

Сервис-ориентированная архитектура на сегодняшний день может быть представлена в «классическом» виде и в формате микросервисов. При этом «классический» сервис-ориентированный подход уже закрепился в определенной нише корпоративных информационных систем, а микросервисная архитектура в последнее время стремительно набирает популярность [22-25]. Причиной этому стало развитие контейнерной виртуализации и практики активного взаимодействия специалистов по разработке и специалистов по информационно-технологическому обслуживанию («практика DevOps»), направленной на автоматизацию разработки программного обеспечения и его масштабируемости.

Однако повышение удобства разработки и эксплуатации микросервисов повлекли за собой отказ от некоторых базовых возможностей, присутствующих изначально в «классической» сервис-ориентированной архитектуре. В частности, интеграция на уровне протоколов взаимодействия в SOA, или так называемое «разделение контракта», позволяет сервису и его потребителям развиваться отдельно, но сохранять согласованное описание интерфейса взаимодействия. Микросервисная архитектура не поддерживает разделение контрактов, хотя это является одной из главных возможностей сервис-ориентированной архитектуры. И именно эта возможность является наиболее перспективной с точки зрения создания систем интеграции разнородных информационных ресурсов при формировании тематических сервисов на базе данных ДЗЗ.

В таблице приведены рассмотренные типы архитектур информационных систем и их применимость для реализации функций информационной поддержки управления развитием территорий. Символы «+», «+/-» и «-» обозначают степень предназначенности или удобства применения той или программной архитектуры для реализации какой-либо функции.

Анализ приведенной таблицы показывает, что монолитная и компонентная архитектуры пригодны для реализации расчетных задач, связанных с формированием требований к материалам съемки и самого заказа, а также могут быть использованы для создания соответствующего пользовательского интерфейса.

Таблица 1. Применимость архитектур информационных систем

Функция системы \ Тип архитектуры	Монолитная	Компонентная	Клиент-серверная	Микросервисы	COA
Обобщенный анализ и автоматизированное формирование требований к составу и характеристикам данных ДЗЗ	+	+	+	+	+
Формирование заказа для поставщиков данных ДЗЗ в соответствии с заданным потребителями требованиями	+	+	+	+	+
Информационно-технологическое взаимодействие с поставщиками ДДЗЗ	-	-	+	+	+
Интеграция данных ДЗЗ с необходимыми информационно-аналитическими ресурсами	-	-	-	-	+
Информационно-технологическое взаимодействие с ИАС органов власти и другими информационными системами	-	-	-	-	+
Взаимодействие с конечными пользователями при заказе и предоставлении сервисов и тематических продуктов	+	+	+	+	+
Формирование банка геоинформационных и тематических продуктов, созданных с использованием данных ДЗЗ	-	-	+	+	+
Информационно-технологическое взаимодействие с внешними системами мониторинга и предоставления данных ДЗЗ	-	-	-	-	+

Клиент-серверная архитектура в узком смысле (СУБД или файл-сервер и «толстый» клиент) может быть применена как для решения этих задач, так и для предоставления данных из хранилищ.

Используя архитектуру микросервисов, удобно решать все задачи, стоящие перед ИПТС, кроме взаимодействия со сторонними информационными системами, в том числе зарубежными. Причиной этого является, как уже упоминалось, отсутствие в архитектуре микросервисов «разделения контракта» и ориентированность его на работу внутри предприятия.

Сервис-ориентированная архитектура изначально была нацелена на интеграцию разнородных распределенных приложений и имеет все соответствующие инструменты для описания их стандартизированного взаимодействия.

**4. Основные компоненты СОА при создании распределенных информационных систем.** Как следует из проведенного анализа, СОА *потенциально* является наиболее приемлемым архитектурным решением для построения распределенных информационных систем, подобных ИПТС. Однако не менее важным является вопрос возможности *практической реализации* СОА для решения перечисленных выше задач. И здесь требуется более глубокий анализ и оценивание возможностей программно-технологических компонентов, обеспечивающих реализацию потенциальных преимуществ СОА.

Наиболее принципиальными вопросами являются способ подключения разнородных модулей в СОА и организация их взаимодействия при формировании и предоставлении каждого конкретного тематического сервиса.

По первому из вопросов необходимо отметить, что СОА не предписывает никакого способа организации информационного потока между множеством сервисов, кроме соединения приложений по принципу «точка-точка». Такое взаимодействие приводит к возникновению проблемы стремительного роста сложности системы при добавлении новых ее участников. Вместо этого целесообразно создавать инфраструктуру для информационного обмена так, чтобы сторонние программные комплексы подключались в виде модулей к универсальному управляющему приложению, организующему вычислительные процессы решения прикладных задач потребителей, а сам информационный обмен строился на принципах событийно-ориентированной архитектуры.

Событийно-ориентированный подход в распределенных информационных системах практически может быть реализован в виде сервисной шины предприятия (Enterprise Service Bus) [26-28]. Она

предоставляет централизованный и унифицированный событийно-ориентированный обмен сообщениями между различными компонентами информационной системы. Обмен сообщениями между различными системами происходит через единую точку, обеспечивающую транзакционный контроль, преобразование данных, аудит сообщений. Принципиальным с точки зрения построения ИПТС и обеспечения независимого функционирования разнородных модулей является тот факт, что при изменении какого-либо компонента информационной системы, подключенного к сервисной шине, нет необходимости в перенастройке остальных подсистем.

В целом функционирование ИПТС на базе сервисной шины предоставляет следующие возможности:

- поддержка синхронного и асинхронного способа вызова веб-служб, что позволяет работать с системами с непредсказуемым временем реакции (в том числе включающие ручной труд);
- использование защищенного транспорта с гарантированной доставкой сообщений, поддерживающего транзакционную модель;
- синтез вычислительных процессов с контролем исполнения и их реконфигурацией;
- доступ к данным из сторонних информационных систем с помощью готовых или специально разработанных адаптеров;
- обработка и преобразование сообщений.

По второму из сформулированных вопросов, касающихся способа реализации СОА, следует заметить, что концепция сервисной шины предоставляет возможность организации синтеза вычислительных процессов, но напрямую не декларирует путь реализации этой возможности. Для описания автоматического управления набором сервисов в зарубежной литературе используется термин «оркестровка веб-служб» [29]. «Оркестровка» описывает то, как сервисы должны взаимодействовать между собой, используя для этого обмен сообщениями, включая бизнес-логику и последовательность действий. В сервис-ориентированной архитектуре оркестровка сервисов реализуется согласно стандарту Business Process Execution Language (WS-BPEL) [30, 31]. За последнее десятилетие WS-BPEL зарекомендовал себя как эффективный язык для описания логики работы приложений, основанных на распределенных веб-сервисах. Применение этого языка позволяет организовать логику взаимодействия модулей и веб-сервисов при решении каждой конкретной прикладной задачи, используя в том числе визуальный редактор. Тем самым обеспечивается визуальное конструирование



алгоритмов работы с данными с задействованием различных источников и сервисов.

Организация взаимодействия с различными веб-сервисами и сторонними информационными системами требует систематизации и унификации доступа к ним. Общепринятым способом упорядочения хранения информации об однородных объектах, к которым можно отнести и сервисы, является *создание реестра*. В информационной системе с сервис-ориентированной архитектурой основной информацией о сервисе является его метаданные, которые имеют стандартизированный вид и представлены в виде описания на языке WSDL. Кроме хранения метаданных, реестр сервисов должен предоставлять возможность их поиска. Существенным требованием к реестру сервисов является возможность машинного (автоматического) поиска требуемого сервиса по запрашиваемому согласованному типу интерфейса и заданным формальным признакам с возможностью его последующей автоматической интеграции в вычислительный процесс. Указанным требованиям удовлетворяет платформу-независимый протокол универсального описания, поиска и интеграции веб-сервисов — UDDI [32, 33]. При работе в окружении веб-сервисов, поддерживаемых различными организациями, немаловажно хранить и учитывать информацию о поставщике сервиса и ответственных за его функционирование лицах.

Реестр сервисов структурно организован в виде трех разделов [34]:

1. «Белые страницы» предоставляют информацию о поставщике услуг, такую как название компании, описание услуги. Эта информация может быть использована для поиска сервиса, принадлежащего конкретной организации. Также предусмотрена возможность предоставления контактной информации, например номера телефона ответственного лица.

2. «Желтые страницы» содержат классификацию службы или бизнеса на основе стандартных таксономий. Рекомендуемые в стандарте таксономии не используются для классификации услуг в отечественных информационных системах, поэтому целесообразно использовать собственные классификаторы.

3. «Зеленые страницы» используются для описания способа получения доступа к веб-службам и информации о привязанных услугах, таких как адрес услуги и параметры, ссылки на спецификации интерфейсов.

Структура реестра UDDI дает возможность реализовать полный цикл управления сервисами «публикация — поиск — связывание», ориентированный прежде всего на автоматическую динамическую

реконфигурацию ИПТС вследствие изменяющейся обстановки и воздействия факторов неопределенности. То есть информационная система способна автоматически поддерживать заданный уровень качества функционирования за счет ее изначальной структурно-функциональной избыточности и автоматического выбора рабочей конфигурации при отказе (или невозможности использования) отдельных ее модулей. Это означает, что использование реестра сервисов может являться технологической основой для реализации интеллектуального выбора типа и настройки параметров разнородных моделей на базе подходов, развиваемых в упомянутой выше квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, при решении тематических задач с использованием данных ДЗЗ.

**5. Структура ИПТС на базе СОА.** Как уже отмечалось, источники данных для ИПТС могут быть территориально и организационно значительно распределены, а необходимые прикладные модули разработаны на различных языках программирования и функционировать на различных аппаратно-программных платформах.

В соответствии с этим, а также учитывая проведенный анализ и выбор информационно-технологических решений для реализации необходимой функциональности на базе СОА, ИПТС должна включать в свой состав структурные компоненты, показанные на рисунке 1.



Рис. 1. Структура ИПТС

Представленные на рисунке компоненты обеспечены необходимым составом стандартов и протоколов для их полнофункциональной реализации применительно к существующим на сегодняшний день технологиям взаимодействия информационных систем.

Следует отметить, что одним из базовых принципов создания и функционирования ИПТС является необходимость обеспечения взаимодействия с поставщиками данных с отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА), а также с информационно-аналитическими системами органов власти местного, регионального и федерального уровней для взаимного обмена данными и результатами решения задач поддержки управленческой деятельности. Для организации такого взаимодействия и обеспечения максимальной автоматизации решения прикладных задач внешние системы также должны удовлетворять ряду требований, основными из которых являются наличие программного интерфейса, то есть возможности взаимодействия без участия пользователя, выполнение разделения данных и их представления, а также наличие механизмов автоматической аутентификации.

**6. Примеры реализации ИПТС на базе сервис-ориентированной архитектуры.** В настоящее время в СПИИРАН реализованы все основные компоненты ИПТС, показанные на рисунке 1, включая модули заказа и каталогизации космической съемки, реализующие процедуры обработки данных ДЗЗ, поступающих с КА Ресурс-П 1, 2, 3 КШМСА, ГЕОТОН, Гиперспектр; Канопус-В и БКА.

Состав формируемых тематических сервисов включает в настоящее время более 20 наименований по направлениям: лесопользование, сельское хозяйство, чрезвычайные ситуации и так далее, и постоянно увеличивается. Сервисы основаны на использовании материалов как российских, так и зарубежных КА ДЗЗ.

Принципиальная возможность создания программных интерфейсов на основе СОА, обеспечивающих интеграцию с внешними источниками данных, разнородными информационно-аналитическими модулями и системами была продемонстрирована при разработке и апробации ряда прототипов для решения задач управления развитием территорий муниципальных образований, оперативного прогнозирования наводнений, обнаружения изменений состояния лесного покрова, водных объектов и ряда других [11]. В этих системах были задействованы источники данных ДЗЗ и наземных измерений, в том числе зарубежные. Главной особенностью созданных прототипов является возможность их работы полностью в автоматическом режиме

за счет организации взаимодействия территориально распределенных разнородных веб-сервисов.

Так, например, при реализации системы оперативного прогнозирования наводнений использовались следующие архитектурные и программные решения:

- сервисная шина, представленная программным продуктом OpenESB;

- интерпретатор сценария на языке BPEL, встроенный в сервисную шину OpenESB;

- программное обеспечение для отображения данных по стандартам веб-картографии GeoServer;

- система управления базой пространственных данных PostgreSQL с дополнением PostGIS;

- сервер администрирования на базе Python;

- сервис сбора данных с гидрологических датчиков (расположен на удаленном сервере №1);

- сервис прогнозирования значений параметров гидродинамических процессов;

- сервис, управляющий работой расчетной гидродинамической модели (расположен на удаленном сервере №2);

- сервис обработки и интерпретации результатов расчетов (расположен на удаленном сервере №3);

- пользовательский веб-интерфейс в виде прогрессивного веб-приложения (под прогрессивными понимаются веб-приложения, использующие стек веб-технологий и объединяющие простоту использования веб-сайта со специфичными для нативных приложений техническими возможностями [35]), адаптированного для работы на стационарных и мобильных пользовательских терминалах и обеспечивающего выполнение принципиального требования о необходимости минимизации специальных знаний потребителя для работы с информационными системами.

Созданный прототип системы оперативного прогнозирования наводнений выполняет в автоматическом режиме полный цикл моделирования: от сбора исходных данных с гидрологических датчиков до обновления результатов прогнозирования в пользовательском интерфейсе. Координацию работы всех подсистем и сервисов осуществляет интерпретатор BPEL процессов посредством сервисной шины. Доступ к информации с гидрологических датчиков предоставляется в формате JSON, расчетные сервисы взаимодействуют по стандартам веб-сервисов используя формат сообщений SOAP. В результате работы системы в базе пространственных данных

формируются записи, которые преобразуются геосервером в формат WMS и поставляются в пользовательский интерфейс. Сам интерфейс предоставляет конечному пользователю необходимый минимум инструментов для работы с результатами прогнозирования: строка поиска пространственных данных, перечень отображаемых в данный момент данных, временная шкала для работы с темпоральными данными. Таким образом, вся сложность, связанная с использованием разнородных территориально распределенных информационных систем, скрыта от пользователя за счет полной автоматизации вычислительного процесса. Это позволяет использовать систему не только специалистам с высоким уровнем знаний в области ГИС и информационных технологий, но и специалистам в предметной области (гидрологии), а также другим пользователям, заинтересованным в результатах прогноза наводнений (службы по чрезвычайным ситуациям, органы исполнительной власти, коммерческие организации и граждане).

Обобщенная схема системы оперативного прогнозирования наводнений представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Обобщенная схема системы оперативного прогнозирования наводнений

Все данные, с которыми работает система, хранятся в битемпоральной базе данных [36]. В ее основе лежит темпоральная (временная) модель данных (ТМД), позволяющая хранить сведения о жизненном цикле данных. ТМД применяется для хранения как исходных данных (гидрометеорологических), так и результатов моделирования. Битемпоральность означает хранение как

времени актуальности определенных данных, так и транзакционного времени (момент записи данных в хранилище).

Использование битемпоральной базы данных обеспечивает как оперативную работу системы мониторинга наводнений, так и работу в режиме моделирования «по прошлому» и сценарного моделирования. Таким образом выполняется анализ обоснованности принятых решений в прошлом с учетом имеющейся информации на заданный момент времени.

Доступ пользователя к темпоральным данным реализован в виде временной шкалы в веб-интерфейсе. Используя этот механизм, пользователь может просматривать различные данные (исходные, исторические и прогнозируемые) без специальных знаний (например, формального языка запросов), просто перемещая ползунок шкалы.

Разработанный прототип системы прошел апробацию при выполнении СПИИРАН ряда проектов на территории РФ и за рубежом.

Наиболее показательны результаты, полученные во время наводнения 2013 г. на реке Даугава (Латвия) в районе г. Даугавпилса. Здесь в качестве гидрологического модуля была использована одна из версий одномерной модели LISFLOOD-FP [37, 38]. Тестовое моделирование проводилось в 2013 г. на участке реки Даугавы протяженностью около 20 км. Верификация гидродинамической модели осуществлялась на основе использования космических снимков с КА «Radarsat-1».

Система прошла испытания, проработав весь период весеннего половодья автоматически, без участия человека.

Созданная подсистема визуализации выполняла несколько этапов постобработки полученных результатов моделирования. Прежде всего, растровая карта затопления автоматически векторизовалась для обеспечения совместимости со сторонними геоинформационными системами. Векторная карта и соответствующая метка времени моделирования автоматически сохранялись в базе данных для формирования архива информации о динамике наводнения.

Второй этап визуализации — размещение результатов моделирования на геопортале. Данный сервис предоставлял возможность просмотра слоев с контурами затопления от начала процесса моделирования до двенадцатичасового прогноза. При этом допускалось наложение слоев, соответствующих различным меткам времени, для наглядного представления динамики развития наводнения (рисунок 3).



Рис. 3. Анализ зон затоплений путем перемещения слайдера временной шкалы

Аналогичный механизм реализован для анализа возможных зон затоплений при различных уровнях подъема воды (рисунок 4).

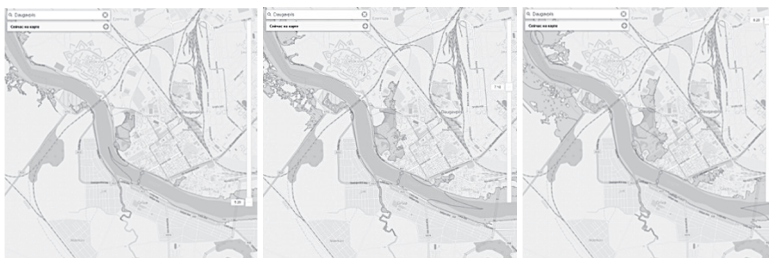


Рис. 4. Анализ возможных сценариев затоплений с помощью вертикальной шкалы

Основным итогом апробации стало подтверждение достаточно высокой точности работы прототипа системы: прогноз затопления значимых объектов инфраструктуры совпал с реальными данными не менее чем на 95%.

В РФ система прошла апробацию в 2014-2017 гг. при выполнении проектов применительно к территории на участке русла реки Северная Двина от г. Великий Устюг до г. Котлас. Здесь в качестве гидродинамического блока использовалась отечественная разработка — двумерная модель STREAM 2D [39, 40], в качестве данных ДЗЗ использовались материалы съемки КА «Ресурс-П».

Результаты сравнения прогнозных и реальных (на основе обработки данных ДЗЗ с КА «Ресурс-П» от 18.04.2016) контуров затоплений, рассчитанных по данным 2016 г., показаны на рисунке 5. Здесь также точность прогноза, оцененная, как и выше, по составу объектов инфраструктуры, попадающих в зону затопления, составила не менее 90 %.

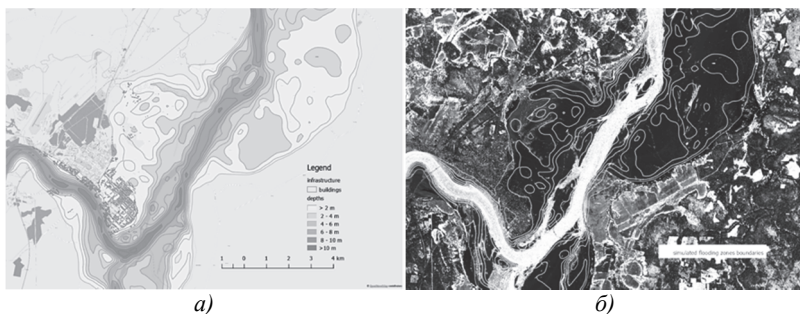


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования (а) с актуальными границами зон затоплений (б)

Пример пользовательского интерфейса другой разработанной системы — обнаружения изменений состояния водных объектов — приведен на рисунке 6.

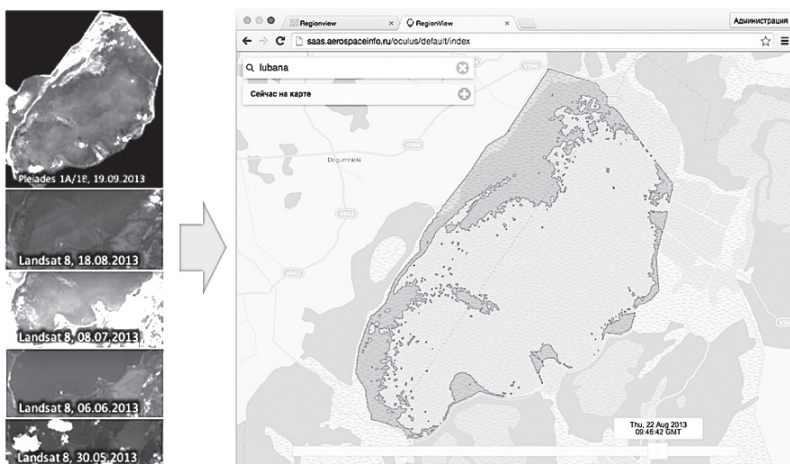


Рис. 6. Пользовательский интерфейс системы обнаружения изменений состояния водных объектов

**7. Перспективные технологии интеграции распределенных информационных ресурсов.** Одним из важнейших преимуществ предложенного подхода к архитектурному построению ИПТС является возможность реализации не только отработанных и хорошо известных сегодня (как это показано в предыдущей части статьи), но и перспективных технологий интеграции разнородных систем.

Их разработка вызвана стремительным ростом числа организаций, предоставляющих данные и сервисы на их основе. Вместе с этим, растет



количество предоставляемых поставщиками типов данных и выполняемых функций, увеличивая сложность каждого задействованного программного интерфейса. В таких условиях ручное согласование взаимодействия с использованием программной документации и интуиции разработчиков становится затруднительным или практически невозможным в процессе синтеза новых распределенных информационных систем. Ряд рассмотренных ниже современных технологий направлен на автоматизацию сопряжения на программном уровне ранее не взаимодействующих друг с другом интерфейсов.

Так, одним из перспективных направлений развития взаимодействия информационных систем является создание методов постепенного согласования программного интерфейса без предварительных знаний об удаленной системе на базе технологии HATEOAS («Hypermedia As The Engine Of Application State» — Гипермедиа как механизм управления состояниями приложения) [41]. Эта технология кратко может быть описана следующим образом: клиентское приложение имеет единую точку входа, сервер на каждый запрос возвращает только гипермедиа ресурсы, то есть те, которые содержат как полезные данные, так и гиперссылки на другие ресурсы гипермедиа. При этом разнородные системы не имеют сведений о структуре программного интерфейса, а формируют их в ходе взаимодействия.

Большие надежды возлагаются на новый язык формирования запросов к программному интерфейсу — GraphQL [42]. Состав результата запроса диктуется клиентом и содержит только необходимый набор данных. Запрос оформляется в форме иерархического набора полей, а ответ приходит в формате JSON с заполнением полей необходимыми данными. У сервера GraphQL можно запросить список поддерживаемых типов и получить сведения о возможностях предоставляемого сервером программного интерфейса без необходимости изучения кода и спецификаций.

Значительным шагом в направлении повышения семантической емкости данных стало появление единой схемы семантической разметки Schema.org [43]. Инициатива была запущена в 2011 году компаниями Google, Microsoft и Yahoo, чуть позже к ней присоединилась российская компания Яндекс. Основной целью Schema.org является помощь в создании метаданных для улучшения качества их поиска. Но в контексте интеграции разнородных систем эта схема семантической разметки рассматривается как универсальная онтология, представляющая утверждения о ресурсах в виде, пригодном для машинной обработки.

Указанная онтология применяется, например, в новой, но уже хорошо зарекомендовавшей себя, технологии JSON-LD («JavaScript Object Notation for Linked Data» — объектная нотация JavaScript для связанных данных) [44]. JSON-LD использует понятие контекста, который связывает свойства объектов в JSON-документе с элементами онтологии. Благодаря этому разнородные информационные системы получают возможность обмениваться значимыми данными (точнее говоря, уже информацией) без предварительного согласования технического интерфейса между собой.

Кроме информационных технологий общего назначения, применительно к обработке данных ДЗЗ и тенденциям повышения семантической емкости данных наблюдается развитие отраслевых спецификаций, изложенных, в частности, в трудах «Рабочей группы по пространственным данным в Интернете» [45], созданной совместно Консорциумом Всемирной паутины (World Wide Web Consortium, W3C) и Открытым геопространственным консорциумом (Open Geospatial Consortium, OGC). В документах этой рабочей группы активно обсуждается Семантическая сеть сенсоров и ее применение для работы с данными дистанционного зондирования Земли [46]. Семантическая сеть сенсоров — это набор технологий Семантической паутины (Semantic web), адаптированный для работы с данными, поставляемыми разнородными сенсорами. Доступ ко всем возможностям разрабатываемой семантической сети сенсоров определяется наличием возможности работать с онтологиями, в частности «Semantic Sensor Network Ontology».

Описанные выше технологии, встроенные в сервисную шину, способствуют расширению круга поставщиков данных и сервисов, которые могут быть привлечены для решения прикладных задач на базе ИПТС за счет упрощения этапа согласования взаимодействия, вплоть до автоматического поиска нового источника данных и машинного анализа его программного интерфейса.

В целом в результате анализа рассмотренных направлений развития технологий интеграции разнородных информационных систем и перспектив их реализации при создании ИПТС можно сделать следующие выводы. Данные технологии к настоящему моменту еще не вышли на продуктивный уровень и не стали повсеместными, поэтому их применение в ИПТС в данный момент требует дополнительной проработки. С другой стороны, очевидно, что в ближайшие годы произойдут существенные изменения в способе организации программных интерфейсов. В связи с этим необходимо отметить, что предлагаемая архитектура построения ИПТС на базе СОА не является принципиальным препятствием для возможного будущего внедрения

рассмотренных перспективных технологий. За счет ориентации на гибкость и эволюционное развитие в ней заложены механизмы постепенного перехода на новые технологии с одновременной работой вновь создаваемых и унаследованных информационных систем.

**8. Заключение.** Проведенный анализ существующих и перспективных технологий интеграции распределенных информационных ресурсов при решении задач поддержки принятия решений по управлению развитием территорий с использованием данных ДЗЗ показал, что в качестве базового подхода к созданию ИПТС целесообразно использовать сервис- и событийно-ориентированные архитектуры в сочетании с технологиями платформи-независимого универсального описания, автоматического поиска и интеграции веб-сервисов. Каждая из рассмотренных технологий в отдельности имеет известные реализации, однако их совместное применение предложено и описано впервые. Приведенные примеры и результаты апробации показывают, что применение такого подхода обеспечивает полную реализацию необходимой функциональности ИПТС и выполнение базовых требований к подобным системам, прежде всего: способности интеграции разнородных территориально распределенных информационных ресурсов при создании и функционировании тематических сервисов, максимально полной автоматизации этих процессов, простоты для пользователя и возможности развития и наращивания функциональных возможностей ИПТС при появлении новых перспективных технологий взаимодействия информационных систем и обработки данных. При проведении дальнейших исследований планируется конкретизация классов задач, для которых предложенные технологические решения являются наиболее эффективными.

### **Литература**

1. Геоаналитика агро. URL: <http://agro.geoanalitika.com/ru/> (дата обращения: 25.08.2017).
2. КосмосАгро. URL: <http://new.scanex.ru/geo-service/kosmosagro/> (дата обращения: 25.08.2017).
3. ВЕГА-PRO. URL: <http://pro-vega.ru/> (дата обращения: 25.08.2017).
4. Copernicus Land Monitoring Service. URL: <http://copernicus.eu/main/land-monitoring> (accessed: 25.08.2017).
5. Copernicus Emergency Management Service. URL: <http://emergency.copernicus.eu/> (accessed: 25.08.2017).
6. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. URL: <http://marine.copernicus.eu> (accessed: 25.08.2017).
7. Copernicus Atmosphere Monitoring Service. URL: <http://atmosphere.copernicus.eu> (accessed: 25.08.2017).
8. Copernicus Climate Change Service. URL: <http://climate.copernicus.eu> (accessed: 25.08.2017).

9. DigitalGlobe EnhancedView Web Hosting Service. URL: <https://www.digitalglobe.com/products/enhancedview-web-hosting> (accessed: 25.08.2017).
10. Fire Information for Resource Management System. URL: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms> (accessed: 25.08.2017).
11. Официальный сайт лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании. URL: <http://litsam.ru/index.php/ru/homepage-ru/projects-ru/> (дата обращения: 25.08.2017).
12. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Применение алгебраического подхода в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2013). Сб. докладов VI научно-практической конференции. Казань: Фэн, 2013. Т. 1. С. 68–79.
13. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Неокибернетика в современной структуре системных знаний // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 2. С. 3–11.
14. Official Thematic Exploitation Platforms website. URL: <https://tep.eo.esa.int/> (дата обращения: 25.08.2017).
15. *Советов Б.Я., Водяхо А.И., Дубенецкий В.А., Цехановский В.В.* Архитектура информационных систем // М.: Издательский центр «Академия». 2012. 288 с.
16. Гринфилд Дж. и др. Фабрики разработки программ: потоковая сборка типовых приложений, моделирование, структуры и инструменты: пер. с англ. // М.: ООО "И.Д. Вильямс". 2007. 592 с.
17. *Gouïgoux J. P., Tamzalit D.* From Monolith to Microservices: Lessons Learned on an Industrial Migration to a Web Oriented Architecture // Proceedings of IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW'2017). 2017. pp. 62–65.
18. *Календарев А.* Современная веб-архитектура. От монолита к микросервисам // Системный администратор. 2017. № 1-2. С. 80–83.
19. *Richards M.* Software Architecture Patterns // O'Reilly Media, Inc. 2015. 47 p.
20. *Oluwatosin H.S.* Client-Server Model // IOSRJ Comput. Eng. 2014. vol. 16. no. 1. pp. 2278–8727.
21. *Paik H. et al.* Web Service Implementation and Composition Techniques // Springer International Publishing. 2017. 256 p.
22. *Ньюмен С.* Создание микросервисов // СПб.: Питер. 2016. 304 с.
23. *Kwan A., Jacobsen H.-A., Chan A., Samoojh S.* Microservices in the modern software world // Proceedings of the 26th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering (CASCON '16). 2016. pp. 297–299.
24. *Bakshi K.* Microservices-based software architecture and approaches // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. 2017. pp. 1–8.
25. *Артамонов Ю.С., Востокин С.В.* Разработка распределенных приложений сбора и анализа данных на базе микросервисной архитектуры // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-4. С. 688–693.
26. *Сысолетин Е.Г., Аксенов К.А., Круглов А.В.* Интеграция гетерогенных информационных систем современного промышленного предприятия // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 335.
27. *Кочанов П. А., Кадиоров Р. В., Надвоцкая В. В.* Построение общего информационного пространства предприятия // Ползуновский альманах. 2016. № 2. С. 157–159.
28. *He W., Xu L.D.* Integration of Distributed Enterprise Applications: A Survey // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014. vol. 10. no. 1. pp. 35–42.
29. *Wang Y.* A formal model of QoS-aware web service orchestration engine // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2016. vol. 13. no. 1. pp. 113–125.

30. *Ting-Huan K., Chi-Hua C., Hsu-Yang K.* Applications of the web service middleware framework based on the BPEL // Proceedings of the IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics. 2016. pp. 1–5.
31. *Некрасов М.В., Белов В.В.* Формирование требований к информационной системе предприятия // Cloud of Science. 2015. Т. 2. № 2. С. 282–301.
32. *Dai Y., Feng Y., Zhao Y., Huang Y.* A method of UDDI service subscription implementation // Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS'2014). 2014. pp. 661–666.
33. *Польская О.В., Кудерметов П.К., Шкарутло В.В.* Обнаружение и выбор Web-сервисов // Электротехнические и компьютерные системы. 2015. № 19. С. 169–173.
34. *Никитюк В.А.* Усовершенствование модели реестра web-сервисов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2014. № 5. С. 98–104.
35. *Gustafson A.* Adaptive web design: crafting rich experiences with progressive enhancement // New Riders. 2015. 264 p.
36. *Тоноян С.А., Сараев Д.В.* Темпоральные модели базы данных и их свойства // Электронный журнал: наука и инновации: Электронное научно-техническое издание. 2014. № 12. С. 36.
37. LISPLOOD-FP. University of Bristol, School of Geographical Sciences, Hydrology Group. URL: <http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/> (дата обращения: 06.04.2017).
38. *Sokolov B.V. et al.* Operational flood forecasting as a web-service // Proceedings of the 29-th European conference on modelling and simulation (ECMS 2015). 2015. pp. 364–370.
39. Беликов В.В., Кочетков В.В. Программный комплекс STREAM\_2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014612181. Российское агентство по интеллектуальной собственности. 2014.
40. *Алабян А.М. и др.* Создание интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86. № 2. С. 127–137.
41. *Patri S.* Pro RESTful APIs // Apress. 2017. 126 p.
42. *Samer B.* Learning GraphQL and Relay // Packt Publishing. 2016. 218 p.
43. *Liyang Yu.* A Developers Guide to the Semantic Web: 2nd edition. // Springer Publishing Company, Incorporated. 2014. 608 p.
44. A JSON-based Serialization for Linked Data. URL: <https://www.w3.org/TR/json-ld> (дата обращения: 24.04.2017).
45. W3C and OGC to Collaborate to Integrate Spatial Data on the Web. URL: <https://www.w3.org/2015/01/spatial.html> (дата обращения: 24.04.2017).
46. Publishing and Using Earth Observation Data with the RDF Data Cube and the Discrete Global Grid System. URL: <https://w3c.github.io/isdw/eo-qb> (дата обращения: 24.04.2017).

**Зеленцов Вячеслав Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор, главный 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 организационно-технических системах с использованием аэрокосмических данных. Число научных публикаций — 300. v.a.zelentsov@gmail.com, <http://litsam.ru>; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-0103, Факс: +7(812)328-4450.

**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: системный анализ и исследование операций, теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 90. [spotryasaev@gmail.com](mailto:spotryasaev@gmail.com), <http://litsam.ru>; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.г.: +7(812)328-0103, Факс: +7(812)328-4450.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке Программ НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1) и «Технология-СГ» (проект 06/НИР/2017), грантов РФФИ (№№16-08-00510, 16-07-00925, 1717-06-00108, 15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-01277), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/К, в рамках бюджетных тем №№0073–2014–0009, 0073–2015–0007, ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074–U01). Исследования по разделам 4,6 проводились при финансовой поддержке гранта РНФ №17-11-01254.

V.A. ZELENTSOV, S.A. POTRIASAEV  
**ARCHITECTURE AND EXAMPLES OF IMPLEMENTING THE  
 INFORMATIONAL PLATFORM FOR CREATION AND  
 PROVISION OF THEMATIC SERVICES USING EARTH REMOTE  
 SENSING DATA**

---

*Zelentsov V.A., Potriasaev S.A. Architecture and Examples of Implementing the Informational Platform for Creation and Provision of Thematic Services Using Earth Remote Sensing Data.*

**Abstract.** The article describes the basics of the design and examples of practical implementation of systems (platforms) for creating and providing thematic services using Earth remote sensing data. The principal features of such systems should be, firstly, the possibility of integrating territorially distributed information resources, including heterogeneous ground-space data and calculation and analysis modules, and secondly, the fullest possible automation of these processes, ensuring interaction with untrained (in the sense of information technologies) user. It is shown that a service-oriented architecture can be the basic approach to creating such systems. Based on a comparative analysis of existing and promising information technologies, the necessary components of the Thematic Services Information Platform (TSIP) were selected. The constructiveness and feasibility of the proposed approach is demonstrated on the examples of practical testing of TSIP when creating thematic services.

**Keywords:** Earth remote sensing data, information platform, thematic service, service-oriented architecture, interdisciplinarity.

---

**Zelentsov Viacheslav Alekseevich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, chief 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 — 300. v.a.zelentsov@gmail.com, <http://litsam.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-0103, Fax: +7(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: system analysis and operations research, theory of managing the structural dynamics of complex organizational and technical systems. The number of publications — 90. spotryasaev@gmail.com, <http://litsam.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-0103, Fax: +7(812)328-4450.

**Acknowledgements.** The research was supported by the Programs of scientific and technical cooperation of the Union State "Monitoring-SG" (project 1.4.1-1) and "Technology-SG" (project 06 / NRI / 2017), RFBR grants (Nos. 16-08-00510, 16-07-00925, 1717-06-00108, 15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-01277), the state assignments of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 2.3135.2017 / K, within the framework of budgetary topics Nos. 0073-2014-0009, 0073-2015-0007, leading universities of the Russian Federation: SPbSPU (activity 6.1.1), ITMO (subsidy 074-U01). Researches on sections 4, 6 were carried out with the financial support of the RSF grant No.17-11-01254.

## References

1. Geoanalitika agro. [Geoanalitika.Agro]. Available at: <http://agro.geoanalitika.com/en/> (accessed: 25.08.2017). (In Russ.).
2. KosmosAgro [CosmosAgro]. Available at: <http://new.scanex.ru/geoservice/kosmosagro/> (accessed: 25.08.2017). (In Russ.).
3. VEGA-RRO [VEGA-PRO]. Available at: <http://pro-vega.ru/> (accessed: 25.08.2017). (In Russ.).
4. Copernicus Land Monitoring Service. Available at: <http://copernicus.eu/main/land-monitoring> (accessed: 25.08.2017).
5. Copernicus Emergency Management Service. Available at: <http://emergency.copernicus.eu/> (accessed: 25.08.2017).
6. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. Available at: <http://marine.copernicus.eu> (accessed: 25.08.2017).
7. Copernicus Atmosphere Monitoring Service. Available at: <http://atmosphere.copernicus.eu> (accessed: 25.08.2017).
8. Copernicus Climate Change Service. Available at: <http://climate.copernicus.eu> (accessed: 25.08.2017).
9. DigitalGlobe EnhancedView Web Hosting Service. Available at: <https://www.digitalglobe.com/products/enhancedview-web-hosting> (accessed: 25.08.2017).
10. Fire Information for Resource Management System. Available at: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms> (accessed: 25.08.2017).
11. Oficial'nyj sajt laboratorii informacionnyh tehnologij v sistemnom analize i modelirovanii [Official site of Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling]. Available at: <http://litsam.ru/index.php/en/homepage-en/portfolio> (accessed: 25.08.2017). (In Russ.).
12. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Jusupov R.M. [The application of the algebraic approach in the qualimetry of models and multimodel complexes]. *Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika (IMMOD-2013). Sb. dokladov VI nauchno-praktičeskoj konferencii.* [The Sixth All-Russia Scientific-Practical Conference on Simulation and its Application in Science and Industry «Simulation. The Theory and Practice» (IMMOD-2013)]. 2013. vol. 1. pp. 68–79. (In Russ.).
13. Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Neo-cybernetics in the modern structure of system knowledge]. *Robototehnika i tehničeskaja kibernetika – Robotics and Technical Cybernetics.* 2014. vol. 2. pp. 3–11. (In Russ.).
14. Official Thematic Exploitation Platforms website. Available at: <https://tep.eo.esa.int/> (accessed: 25.08.2017).
15. Sovetov B.Ja., Vodjaho A.I., Dubeneckij V.A., Cehanovskij V.V. *Arhitektura informacionnyh sistem* [Architecture of information systems]. M.: Izdatel'skij centr «Akademija». 2012. 288 p. (In Russ.).
16. Greenfield J. et al. *Software Factories: Assembling Applications with Patterns, Models, Frameworks, and Tools.* John Wiley & Sons. 2004. 666 p. (Russ. ed.: Grinfil'd Dzh. et al. *Fabriki razrabotki programm: potokovaja sborka tipovyh prilozhenij, modelirovanie, struktury i instrumenty: per. s angl.* M.: OOO "I.D. Vil'jams". 2007. 592 p.).
17. Gouigoux J.P., Tamzalit D. From Monolith to Microservices: Lessons Learned on an Industrial Migration to a Web Oriented Architecture. Proceedings of IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW'2017). 2017. pp. 62–65.
18. Kalendarev A. [Modern web architecture. From monolith to micro services]. *Sistemnyj administrator – System Administrator.* 2017. vol. 1-2. pp. 80–83. (In Russ.).
19. Richards M. Software Architecture Patterns. O'Reilly Media, Inc. 2015. 47 p.



20. Oluwatosin H.S. Client-Server Model. *IOSRJ Comput. Eng.* 2014. vol. 16. no. 1. pp. 2278–8727.
21. Paik H. et al. *Web Service Implementation and Composition Techniques* // Springer International Publishing, 2017. 256 p.
22. N'jumen S *Sozdanie mikroservisov* [Creation of microservices]. SPb.: Piter. 2016. 304 p. (In Russ.).
23. Kwan A., Jacobsen H.-A., Chan A., Samooj S. Microservices in the modern software world. Proceedings of the 26th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering (CASCON '16). 2016. pp. 297–299.
24. Bakshi K. Microservices-based software architecture and approaches. Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. 2017. pp. 1–8.
25. Artamonov Yu.S., Vostokin S.V. [Development of distributed applications for data collection and analysis based on microservice architecture]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk – Ivestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. vol. 18. no. 4-4. pp. 688–693. (In Russ.).
26. Sysoletin E.G., Aksenov K.A., Kruglov A.V. [Integration of heterogeneous information systems of a modern industrial enterprise]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija – Modern problems of science and education*. 2015. vol. 1-1. pp. 335. (In Russ.).
27. Kochanov P.A., Kadirov R.V., Nadvockaja V.V. [Construction of the general information space of the enterprise]. *Polzunovskij al'manah – Polzunovskij almanac*. 2016. vol. 2. pp. 157–159. (In Russ.).
28. He W., Xu L.D. Integration of Distributed Enterprise Applications: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. vol. 10. no. 1. pp. 35–42.
29. Wang Y. A formal model of QoS-aware web service orchestration engine // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2016. vol. 13. no. 1. pp. 113–125.
30. Ting-Huan K., Chi-Hua C., Hsu-Yang K. Applications of the web service middleware framework based on the BPEL. Proceedings of the IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics. 2016. pp. 1–5.
31. Nekrasov M.V., Belov V.V. [Formation of requirements for the information system of the enterprise]. *Cloud of Science*. 2015. vol. 2. no. 2. pp. 282–301. (In Russ.).
32. Dai Y., Feng Y., Zhao Y., Huang Y. A method of UDDI service subscription implementation. Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS'2014). 2014. pp. 661–666.
33. Pol'skaja O.V., Kudermetov R.K., Shkarupilo V.V. [Detection and selection of Web services]. *Jelektrotehnicheskie i komp'juternye sistemy – Electrotechnic and computer systems*. 2015. vol. 19. pp. 169–173. (In Russ.).
34. Nikitjuk V.A. [Improvement of the model of the register of web-services]. *Visnik Kremenčuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrogradskogo – Transactions of Kremenčuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University*. 2014. vol. 5. pp. 98–104. (In Russ.).
35. Gustafson A. Adaptive web design: crafting rich experiences with progressive enhancement. *New Riders*. 2015. 264 p.
36. Tonojan S.A., Saraev D.V. [Temporal models of the database and their propertie]. *Jelektronnyj zhurnal: nauka i innovacii: Jelektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie – Engineering Journal: Science and Innovation*. 2014. vol. 12. pp. 36. (In Russ.).
37. LISPFLLOOD-FP. University of Bristol, School of Geographical Sciences, Hydrology Group. Available at: <http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/> (accessed: 06.04.2017).
38. Sokolov B.V. et al. Operational flood forecasting as a web-service. Proceedings of the 29-th European conference on modelling and simulation (ECMS 2015). 2015. pp. 364–370. (In Russ.).

39. Belikov V.V., Kochetkov V.V. *Programmnyj kompleks STREAM\_2D dlja raschjota techenij, deformatsij dna i perenosa zagrijaznenij v otkrytyh potokah* [The program complex STREAM\_2D for the calculation of currents, deformations of the bottom and transfer of pollution in open streams]. Certificate of state registration of computer programs no. 2014612181. Rossijskoe agentstvo po intellektual'noj sobstvennosti, 2014. (In Russ.).
40. Alabjan A.M. et al. [Creation of intelligent information systems for operational forecasting of river floods]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk – Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2016. Issue 86. vol. 2. pp. 127–137. (In Russ.).
41. Patni S. *Pro RESTful APIs*. Apress. 2017. 126 p.
42. Samer B. *Learning GraphQL and Relay*. Packt Publishing. 2016. 218 p.
43. Liyang Yu. *A Developers Guide to the Semantic Web: 2nd edition*. Springer Publishing Company, Inc. 2014. 608 p.
44. A JSON-based Serialization for Linked Data. Available at: <https://www.w3.org/TR/json-ld> (accessed: 24.04.2017).
45. W3C and OGC to Collaborate to Integrate Spatial Data on the Web. Available at: <https://www.w3.org/2015/01/spatial.html> (accessed: 24.04.2017).
46. Publishing and Using Earth Observation Data with the RDF Data Cube and the Discrete Global Grid System. Available at: <https://w3c.github.io/sdw/eo-qb> (accessed: 24.04.2017).

С.И. КОЛЕСНИКОВА  
**СИСТЕМА МНОЖЕСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ  
НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА С НЕПОЛНЫМ ОПИСАНИЕМ**

---

*Колесникова С.И.* **Конструирование множественного управления нелинейным объектом.**

**Аннотация.** Предлагается алгебраический подход к конструированию системы множественного управления для нелинейных многомерных объектов с хаотическими режимами с целью вывода объекта в аналитически заданное устойчивое состояние. Рассмотрены непрерывные и дискретные объекты управления, представленные системами нелинейных дифференциальных или разностных уравнений, соответственно, часть описания которых не определена. Предлагаемый алгоритм управления реализован на совместном применении методов нелинейного управления на многообразиях, функций Ляпунова и алгебраическом подходе к синтезу корректных алгоритмов. Рассмотрены две прикладные задачи экономической направленности с непрерывной и дискретной моделями описания. Численное моделирование осуществлено на реальных данных малых предприятий. Результаты работы предполагается использовать в системе поддержки принятия экономических решений.

**Ключевые слова:** нелинейный многомерный объект, плохо формализуемый объект, целевое многообразие, множественное управление, коллектив алгоритмов управления.

---

**1. Введение.** Предметом настоящего исследования является проблема управления нелинейными многомерными объектами, неустойчивыми в разомкнутом состоянии и имеющими все признаки плохо формализуемых объектов (или сложных по Л.А. Растригину): невозможность полного аналитического описания; параметрическая многомерность, «нетерпимость» к управлению, странные аттракторы среди предельных состояний.

Поскольку задачи управления хаотическими объектами являются, как правило, некорректными, то естественно рассматривать задачу достижения объектом управления не отдельного заданного состояния, а некоторого целевого множества состояний, попадая в которое, объект будет обладать требуемыми и содержательно определенными физическими свойствами [1-4]. В условиях «невозможности создания общей теории нелинейных систем» (по Нейману) представляют несомненный интерес наиболее «физичные» методы синтеза систем управления, то есть такие, которые при постановке задачи управления и ее решении учитывают инвариантные соотношения и физические ограничения для описания объекта и его целевых свойств, к которым, например, в определенной степени относятся конструирование управления в скользящих режимах [5], бэкстеппинг [6, 7] или обход интегратора, метод инвариантного погружения [8], метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) (например, [4, 9]).

В последнее десятилетие подробный математический анализ специальных классов систем управления неоднократно проводился [1-4, 10], в том числе и *аналитических* методов синтеза управления нелинейными объектами с хаотическими режимами, список которых невелик. Основная сложность привлекательных в математическом плане указанных методов состоит в том, что синтез управления многомерными, много связными объектами без предварительной линеаризации зачастую сталкивается с проблемами вычислительного характера (метод Летова-Калмана с применением функционала обобщенной работы, управление в скользящих режимах...) (см. наиболее полный обзор А.А. Красовского в [4], а также обзор в [2, 3]). Поэтому имеется определенный интерес к теории и к практике адаптивного управления с использованием нескольких моделей, общий подход к конструированию которых возник с целью решения вопросов создания устойчивых систем управления с медленно и быстро меняющимися параметрами [11, 12].

Использование множественных моделей (или моделей переменной структуры) имеет в основе принцип адаптации или обратной связи для уменьшения консерватизма в процессе управления, однако ее решение в наиболее общем виде до сих пор задача открытая [13, 14]. Базовые (множественные) модели возникают либо на основе представления исходного объекта совокупностью кусочно-линеаризованных (см. обзор в [1, 11]), либо на основе политики переключения регуляторов [11, 12, 15], что улучшает качество переходных процессов и повышает устойчивость синтезируемой системы управления.

Важно отметить, что фундаментальные конструктивные положения множественного адаптивного управления, заложенные в трудах С.В. Емельянова, K.S. Narendra, J. Balakrishnan и получившие активное применение в 90-е годы прошлого столетия в технических проектах, по-прежнему составляют базу современных отечественных и зарубежных исследований в прикладных задачах теории множественного адаптивного управления (ММАС), представленных в основном в следующих классах задач (например, [15-18]):

1) задачи оптимизации обучения системы множественного управления или разработки алгоритмов использования доступной выборки для идентификации шумовой составляющей и настройки параметров локальных регуляторов; решаемые вопросы связаны с исследованием эффективности схем переключения, с анализом устойчивости и робастности, с выяснением условий стабилизируемости системы множественного управления («узким» местом таких систем);

2) задачи управления процессами с изменяющимися во времени параметрами [19];

3) задачи интеллектуального управления, включающие задачи управления нелинейными процессами на основе нечетких моделей, динамических нейронных сетей (PDNN) [20].

В последнем случае математическое описание объекта и регулятора представлено, как правило, множеством линейных моделей, аппроксимирующих локальные свойства системы, а операция линеаризации практически во всех случаях является основным инструментом для физической организации адаптивного управления на основе совокупности регуляторов. Следует также отметить, что применение идеологии множественного управления в сетевых системах управления (NCS) заслуживает отдельного анализа, поскольку в распределенных объектах существенным является зависимость от топологии сети и от физических ограничений каналов связи.

В статье поставлена задача конструирования системы множественного управления на основе нелинейных (базовых) алгоритмов управления без предварительной линейной параметризации исходного нелинейного объекта как, например, в [12], поэтому может быть полезна для всех объектов, для которых операция линеаризации не является желательной или затруднительной (например, в системах управления с техническим зрением).

Предлагается алгоритм, соединяющий достоинства методов управления в скользящем режиме, АКАР, функций Ляпунова и алгебраический подход к синтезу корректных алгоритмов. В качестве базовых будут использованы управления, полученные на основе метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [4], который отвечает требованиям физической теории управления [1]. Достоинство методов синтеза систем управления на многообразиях заключается и в том, что при достижении окрестности заданного многообразия удерживание траекторий объекта в его окрестности не зависит от значений неопределенности в описании объекта (в необременительных условиях [2-9]), но область их применимости в данное время в основном ограничена физическими приложениями [9, 10, 21].

В статье впервые рассмотрена постановка задачи управления в экономической модели на основе обобщения метода агрегированных регуляторов для объектов с неполным описанием [9, 22], а именно задача вывода плохо формализуемого экономического объекта из хаотического состояния в устойчивое.

**2. Основные понятия и определения.** Для лучшего восприятия текста приведем несколько понятий и утверждений [4].

Множества  $V \subset \mathbb{R}^n$  называются инвариантными по отношению к потоку  $x(t, x_0, t_0)$ , если  $x(t, x_0, t_0) \in V$  для любых  $x_0 \in V$  для всех  $t > t_0$ , где

$x_f: (x_0, t_0) \rightarrow (x, t), \dot{x} = f(x) + u, x \in R^n, u \in R^m, m \leq n$  (фазовый поток системы).

Напомним, что формализм инвариантов применялся для построения регулятора для линейной системы с полной компенсацией возмущений [23].

Множество  $V$  называется притягивающим или аттрактивным, если оно замкнутое, инвариантное и для некоторой окрестности  $a_V$  множества  $V$ , для всех  $x_0 \in a_V$  имеют место предельные соотношения:  $x_f(t, x_0, t_0) \in a_V \forall t \geq 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_f(t, x_0, t_0)\|_V = 0$ .

Под макропеременными понимают некоторые определенные функции  $\psi(x)$  от координат объекта; равенство  $\psi(x) = 0$  определяет целевое множество состояний.

Постановка задачи управления на многообразии включает в себя: а) объект управления, заданных системой обыкновенных дифференциальных уравнений или системой разностных (нелинейных) уравнений для непрерывной и дискретной задач управления соответственно; б) цель управления в виде аналитически заданного уравнения  $\psi(x) = 0$ ; в) выполнение требований: множество состояний, подчиняющихся описанию  $\psi(x) = 0$ , есть инвариантное многообразие; решения исходной системы уравнений ограничены; существует режим стабилизации объекта в окрестности  $\psi(x) = 0$ .

АКАР-управлением будем называть (векторную) переменную  $u^A(x(t)) = (u_1^A, \dots, u_m^A)$ , доставляющую решение вариационной задаче:

$$\Phi_C = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^m (\psi_i^2 + \omega_i^2 \dot{\psi}_i^2(t)) dt \rightarrow \min,$$

$$\Phi_D = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=1}^m (\omega_i^2 \psi_{i,n}^2 + (\Delta \psi_{i,n})^2) \rightarrow \min$$

при ограничении  $\psi(x(t)) = 0, \psi(x_s) = (\psi_1(x_s), \dots, \psi_m(x_s))$ ,  $\psi(x_s) = 0, \psi(x_s) = (\psi_1(x_s), \dots, \psi_m(x_s))$  в непрерывном и дискретном случаях соответственно. Далее указанные вариационные задачи будем обозначать парой символов  $(\Phi_C, \psi), (\Phi_D, \psi)$ .

Математический аппарат метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов основан на следующих утверждениях

ях, доказательство которых опирается на результаты теоретической механики [24].

*Утверждение 1.* Пусть имеет место вариационная задача:

$$J_C = \int_0^{\infty} F(t, \psi, \dot{\psi}) dt \rightarrow \min, \quad \psi = 0, \quad \text{где } F(t, \psi, \dot{\psi}) = \dot{\psi}^2 + \omega^2 \psi^2. \quad \text{Тогда}$$

уравнение Эйлера — Лагранжа (в условиях применения АКАР) для  $J_C$  будет иметь вид:  $\omega \dot{\psi} + \psi = 0$ .

*Утверждение 2.* Пусть имеет место вариационная задача:

$$J_D = \sum_{t=0}^{\infty} \left( \omega^2 \psi_t^2 + (\Delta \psi_t)^2 \right) \rightarrow \min, \quad \psi = 0, \quad \text{где } \psi_t = \psi(x(t)), t \in \mathbb{N}. \quad \text{Урав-$$

нение  $\psi_{t+1} + \lambda \psi_t = 0, |\lambda| < 1, t \geq 1$  является уравнением Эйлера — Лагранжа для  $J_D$ . При этом скаляры  $\lambda$  и  $\omega$  связаны соотношением:

$$\lambda = 0.5 \left( 2 + \omega^2 - \sqrt{(2 + \omega^2)^2 - 4} \right).$$

**3. Обобщение алгоритма АКАР для объектов с неполным описанием.** Рассмотрим объект с непрерывным наиболее общим описанием:

$$\dot{x}_j(t) = f_j(x_1, \dots, x_n) + u_j, \quad j = \overline{1, m},$$

$$\dot{x}_j(t) = f_j(x_1, \dots, x_n), \quad j = \overline{m+1, n},$$

где  $x \in R^n$  — вектор состояний,  $u \in R^m, m < n$ , — вектор управления,  $f \in R^n$  — нелинейная ограниченная вектор-функция; компоненты  $f_1, \dots, f_m$  вектора  $f \in R^n$  неизвестны.

Предполагается, что существуют оценки  $\hat{f}_j, j = \overline{1, m}$  неизвестных описаний  $f_j, j = \overline{1, m}$  такие, что выполнены все условия для существования АКАР-управления  $u^A = (u_1^A, \dots, u_m^A)$  для объекта:

$$\dot{x}_j(t) = \hat{f}_j(x_1, \dots, x_n) + u_j, \quad j = \overline{1, m},$$

$$\dot{x}_j(t) = f_j(x_1, \dots, x_n), \quad j = \overline{m+1, n}.$$

Приведем основные положения алгоритма, основанного на совмещении методики АКАР и функций Ляпунова [22, 25]:

1) замена неизвестного описания  $f_j, j = \overline{1, m}$  ее оценкой  $\hat{f}_j, j = \overline{1, m}$  (например, верхней границей [5]);

2) преобразование управляющих переменных:  $u_j = u_j^A + v_j, j = \overline{1, m}$ , где  $u_j^A$  — АКАР-управление для системы, полученной из исходной после применения операции п.1);  $v_j$  — управление, предназначенное для компенсации возникающего возмущения после замены неизвестного описания ее оценкой;

3) декомпозиция исходного описания на основе подстановки найденных соотношений для  $u_j^A, j = \overline{1, m}$ ;

4) поиск управлений  $v_j$  на базе функции Ляпунова вида

$$V(t) = \sum_{i=1}^m (\psi_i^2(t) + v_i^2(t)).$$

Задача поиска управлений  $v_j, j = \overline{1, m}$  сводится к поиску соотношений для  $v_j, j = \overline{1, m}$ , обеспечивающих условие  $\dot{V}(t) < 0$ . Специфика управлений  $u_j^A, j = \overline{1, m}$  такова, что после шага 3) определение вида функции Ляпунова не является (в практически важных случаях вида  $\Psi$ ) затруднительным.

Синтез системы управления закончен. В результате получим модель управления, обусловленную применяемой на шаге п.1, видом оценки неизвестного описания.

**4. Примеры применение метода АКАР для объектов с неполным описанием.** Рассмотрим два примера, в которых объекты управления — балансовые модели малого предприятия и рынка двух производителей соответственно (подробное описание моделей без управления представлено в [4, 26]).

Численное моделирование ниже приведенных систем управления основано на реальных данных.

Рассмотрим основные шаги алгоритма на конкретных примерах.

*Пример 1.* Рассмотрим непрерывную модель ( $n=3, m=2$ ):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3) + u_1, \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3), \\ \dot{x}_3 &= f_3(x_1, x_2, x_3) + u_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x \in R^3$  вектор состояний,  $u \in R^2$  вектор управлений,  $f \in R^3$  нелинейная векторная функция; компоненты  $f_1, f_3$  вектора  $f \in R^3$  неизвестные ограниченные функции,  $f_2 = \mu(x_2 + x_3) - \beta x_1 x_3, \mu, \beta \in R$ . Согласно алгоритму п.3, осуществляем преобразования уравнений, содержащих неопределенность в описании:  $\dot{x}_i = \hat{f}_i + (f_i - \hat{f}_i) + u_j, i = 1, 3; j = 1, 2$ , по-



лучаем объект управления в виде:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \hat{f}_1 + \eta_1 v_1 + u_1^A, \\ \dot{x}_2 &= f_2, \\ \dot{x}_3 &= \hat{f}_3 + \eta_2 v_2 + u_2^A,\end{aligned}\tag{2}$$

где АКАР-управления будут определяться для системы (2) в условиях  $\eta_1 = \eta_2 = 0$ . Пусть заданы целевые макропеременные в виде:

$$\begin{aligned}\psi_1(t) &= x_1(t) - \rho x_2(t), \\ \psi_2(t) &= x_3(t) - x_3^*,\end{aligned}\tag{3}$$

где  $x_3^*$  — заданное целевое значение переменной  $x_3$ .

*Утверждение 3.* Если цель управления будет задана в виде  $\psi = 0, \psi = (\psi_1, \psi_2)$ , где  $\psi_1, \psi_2$  из (3), то итоговое описание регулятора для объекта (1) примет вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \hat{f}_1(x_1, x_2, x_3) + u_1^A + \eta_1 v_1, \\ \dot{x}_2 &= \mu(x_2 + x_3) - \beta x_1 x_3, \\ \dot{x}_3 &= \hat{f}_3(x_1, x_2, x_3) + u_2^A + \eta_2 v_2, \\ \dot{v}_j &= -\eta_j \psi_j, \quad \eta_j > 0, \quad j = 1, 2.\end{aligned}\tag{4}$$

При этом закон управления  $u_i = u_i^A + \eta_i v_i, i = 1, 2$  гарантирует выполнение всех целевых установок задачи управления для плохо формализованного объекта (1), а именно: 1) решение вариационной задачи  $\Phi_C = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^2 (\psi_i^2 + \omega_i^2 \dot{\psi}_i^2) dt \rightarrow \min, \omega_i > 0, i = 1, 2$  при ограничении  $\psi = 0, \psi = (\psi_1, \psi_2)$  или, что то же самое, достижение целевого множества  $\psi = 0$  в смысле  $\Phi_C \rightarrow \min$ ; 2) асимптотическую устойчивость объекта (1) в окрестности  $\psi = 0$ .

*Доказательство.* Найдем управления  $u_i^A, i = 1, 2$  для объекта с описанием:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \hat{f}_1 + u_1^A, \\ \dot{x}_2 &= f_2, \\ \dot{x}_3 &= \hat{f}_3 + u_2^A,\end{aligned}$$

Используя технику АКАР, аналитический вид целевого множества  $\Psi = 0, \Psi = (\Psi_1, \Psi_2)$ , функциональные уравнения  $T_i \dot{\Psi}_i + \Psi_i = 0, i = 1, 2$ , доставляющие глобальный минимум функционалу качества  $\Phi_C = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^2 (\Psi_i^2 + \omega_i^2 \dot{\Psi}_i^2) dt, \omega_i > 0, i = 1, 2$ , получим соотношения для управлений  $u_1^A, u_2^A$ :

$$\begin{aligned} u_1^A &= -\omega_1^{-1} \Psi_1(t) - \hat{f}_1 + \rho f_2, \\ u_2^A &= -\omega_2^{-1} \Psi_2(t) - \hat{f}_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Для нахождения управлений  $v_1, v_2$  осуществляем сначала декомпозицию системы (2) с учетом управлений (5):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \eta_1 v_1 - \omega_1^{-1} \Psi_1(t) + \rho f_2, \\ \dot{x}_2 &= f_2, \\ \dot{x}_3 &= \eta_2 v_2 - \omega_2^{-1} \Psi_2(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Затем вычисляем производную функции  $V(t) = 0.5 \sum_{i=1}^2 (\Psi_i^2 + v_i^2)$

Ляпунова  $\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^2 (\Psi_i \dot{\Psi}_i + v_i \dot{v}_i)$ , куда подставляем уравнения системы (6). Опуская подробности преобразований, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^2 \left( \Psi_i \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \Psi_i}{\partial x_j} \dot{x}_j + v_i \dot{v}_i \right) = \\ &= v_1 (\eta_1 \Psi_1 + \dot{v}_1) + v_2 (\eta_2 \Psi_2 + \dot{v}_2) - \omega_1^{-1} \Psi_1^2(t) - \omega_2^{-1} \Psi_2^2(t). \end{aligned}$$

Формируем недостающие управления  $v_i$ , определяемые, например, из условия:

$$\dot{v}_i = -\eta_i \Psi_i, i = 1, 2, \quad (7)$$

обеспечивающего требование отрицательности  $\dot{V}(t) < 0$ . Таким образом, управления  $v_i$  из (7) обеспечивают отрицательность производной функции Ляпунова  $\dot{V}(t) < 0$  и тем самым гарантирует вместе с зако-

ном (5) выполнение всех целевых установок задачи управления для плохо формализованного объекта (1). Собирая (2), (5), (7), получим (4).

Утверждение 1 доказано.

На рисунке 1 приведены результаты управления (5), (7) с оценками  $\hat{f}_1, \hat{f}_3$ :  $\hat{f}_1 = \alpha x_2 x_3 - \gamma x_1, \hat{f}_3 = \delta x_2 - \lambda x_3$ , полученных при значениях параметров  $\alpha, \gamma, \delta, \lambda$ , сопоставленных реальным данным (бухгалтерская отчетность малого предприятия при интерпретации переменных [4, 26]  $x_1, x_2, x_3$  в виде затрат на содержание сотрудников, величины капитала и кредита соответственно) при «подгонке» по методу наименьших квадратов.

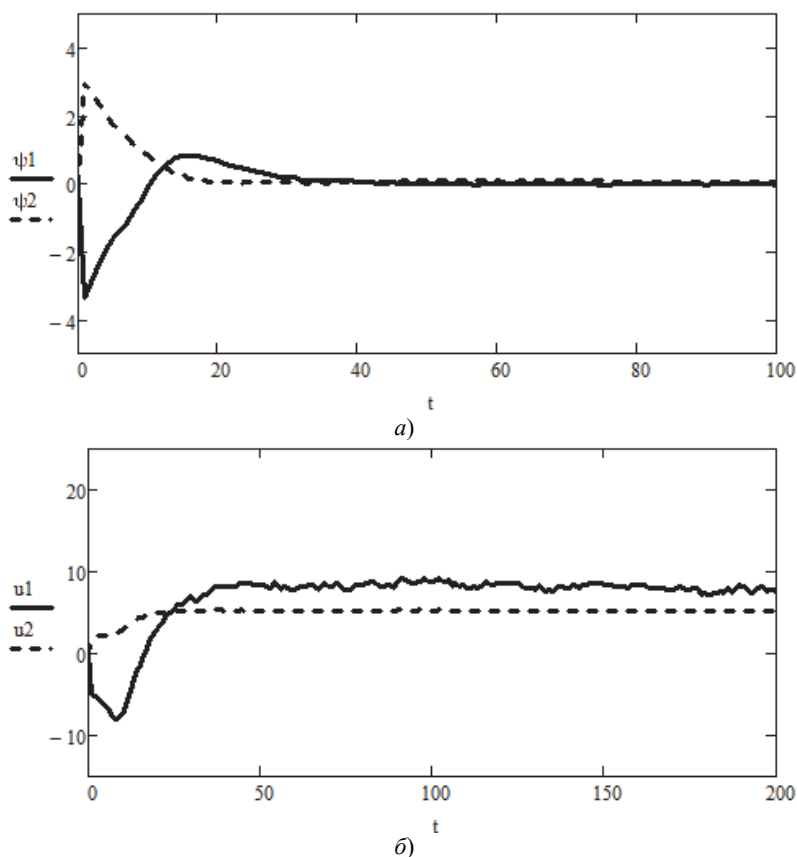


Рис. 1. Форма переходного и установившегося процессов: а) для целевых макропеременных  $\Psi_1, \Psi_2$ ; б) управлений  $u_1, u_2$

*Пример 2.* Рассмотрим дискретную балансовую модель ( $n=2$ ) рынка двух производителей  $X, Y$  однотипной продукции [4, 26], построенной на основе модели Фейгенбаума и имеющей в этой связи среди предельных состояний хаотические:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= F_{X,i}, F_{X,i} = X_i (\alpha C_0 - \mu \beta_X X_i Y_i), \\ Y_{i+1} &= F_{Y,i}, F_{Y,i} = A (\alpha C_0 - \mu \beta_Y X_i Y_i), i \geq 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Переменные в (8)  $X_i, Y_i$  интерпретируются как объемы продукции на рынке, произведенные субъектами  $X, Y$  соответственно; коэффициенты пропорциональности  $\alpha, C_0, \mu$  имеют конкретный содержательный экономический смысл, а величины  $\beta_X, \beta_Y$  означают цены, устанавливаемые производителями  $X, Y$  соответственно.

Алгоритм синтеза системы управления для объекта с неполной информацией (п. 3) обеспечивает возможность новой постановки задачи управления ( $n=4$ ) таким образом, что достижение заданного множества состояний  $\psi(X_i, Y_i) = 0, i \geq 1$  будет обеспечиваться влиянием на процесс ценообразования как со стороны  $X$ , так и со стороны  $Y$ , или со стороны обоих производителей одновременно:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i (\alpha C_0 - \mu \beta_{X,i} X_i Y_i), \\ Y_{i+1} &= A (\alpha C_0 - \mu \beta_{X,i} X_i Y_i), \\ \beta_{X,i+1} &= f_{X,i} + u_{1i}, \\ \beta_{Y,i+1} &= f_{Y,i} + u_{2i}, i \geq 1, \end{aligned} \quad (9)$$

где функции  $f_{X,i}, f_{Y,i}$  не определены, что вполне согласуется с «правилами» реальных рыночных игр. Согласно основным положениям метода нелинейной адаптации и алгоритму п.3, получаем управление в виде:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i (\alpha C_0 - \mu \beta_{X,i} X_i Y_i), \\ Y_{i+1} &= A (\alpha C_0 - \mu \beta_{X,i} X_i Y_i), \\ \beta_{X,i+1} &= \hat{f}_{X,i} + \eta_1 v_{1,i} + u_{1,i}^A, \\ \beta_{Y,i+1} &= \hat{f}_{Y,i} + \eta_2 v_{2,i} + u_{2,i}^A, \\ v_{1,i+1} &= v_{1,i} + \eta_1 \psi_{1i}, \\ v_{2,i+1} &= v_{2,i} + \eta_2 \psi_{2i}, i \geq 1, \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты пропорциональности  $\eta_j, j=1,2$  есть параметры оптимизации системы управления (10).

Пусть цель управления задана в виде требований:

$$\begin{aligned}\psi_{1,i} &= Y_i - Y^0 = 0, \\ \psi_{2,i} &= X_i - \rho Y_i = 0, \rho \in (0;1), i \geq 1,\end{aligned}\tag{11}$$

содержательно означающим достижение производителем  $Y$  заданного объема продаж  $Y^0$  и заданного предельного равновесия на рынке  $X_i - \rho Y_i = 0, i \rightarrow \infty$ .

*Утверждение 4.* Если цель управления задана в виде  $\psi = 0, \psi = (\psi_1, \psi_2)$ , где  $\psi_1, \psi_2$  из (11), то система управления для объекта (9) вида:

$$\begin{aligned}X_{i+1} &= X_i (\alpha C_0 - \mu \beta_{X,i} X_i Y_i), \\ Y_{i+1} &= A (\alpha C_0 - \mu \beta_{Y,i} X_i Y_i), \\ \hat{\beta}_{X,i+1} &= \hat{f}_{X,i} + \eta_1 v_{1,i} + u_{1,i}^A, \\ \hat{\beta}_{Y,i+1} &= \hat{f}_{Y,i} + \eta_2 v_{2,i} + u_{2,i}^A, \\ v_{1,i+1} &= v_{1,i} + \eta_1 \psi_{1i}, \\ v_{2,i+1} &= v_{2,i} + \eta_2 \psi_{2i};\end{aligned}\tag{12}$$

$$\begin{aligned}u_{1,i}^A &= -\hat{f}_{X,i} - v_{1,i} + \phi_{1,i+1} - \lambda_1 \hat{\beta}_{X,i} + \lambda_1 \phi_{1,i}, \\ u_{2,i}^A &= -\hat{f}_{Y,i} - v_{2,i} + \phi_{2,i+1} - \lambda_2 \hat{\beta}_{Y,i} + \lambda_2 \phi_{2,i};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_{1,i} &= (\mu X_i^2 Y_i)^{-1} \left( X_i \alpha C_0 + \rho (-Y_{i+1}^0 + k_1 (v_{1,i} + \eta_1 \psi_{1i}) + \lambda_3 (\psi_{1,i} + k_1 v_{1,i})) + \right. \\ &\quad \left. + k_2 (v_{2,i} + \eta_2 \psi_{2i}) + \lambda_4 (\psi_{2,i} + k_2 v_{2,i}) \right), \\ \phi_{2,i} &= (A \mu X_i Y_i)^{-1} (A \alpha C_0 - Y_{i+1}^0 + k_1 (v_{1,i} + \eta_1 \psi_{1i}) + \lambda_3 (\psi_{1,i} + k_1 v_{1,i}))\end{aligned}$$

гарантирует выполнение всех целевых установок задачи управления для плохо формализованного объекта (9), а именно: 1) решение вариационной задачи  $\Phi_D \rightarrow \min$  при ограничении  $\psi = 0, \psi = (\psi_1, \psi_2)$  или, что то же самое, достижение целевого множества  $\psi = 0$  в смысле

$$\Phi_D \rightarrow \min, \quad \text{где} \quad \Phi_D = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^2 \left( \omega_j^2 \psi_{j,i}^2 + (\Delta \psi_{j,i})^2 \right) \rightarrow \min, \quad \omega_j > 0, j = 1, 2;$$

2) асимптотическую устойчивость объекта (9) в окрестности  $\Psi = 0$  (здесь в обозначении  $\Psi_{j,i}$  первый индекс указывает на номер компоненты вектора  $(\Psi_1, \Psi_2)$ , второй индекс указывает на номер временных отсчетов).

Доказательство утверждения 4 проведем с позиций синтеза управления на базе нелинейной адаптации на заданном многообразии, поскольку равносильность алгоритмов из п.3 и нелинейной адаптации (например, [7]) показана в [16].

Введем сначала макропеременные  $\Psi_1^{(1)} = \hat{\beta}_{X,i} - \Phi_1(X_i, Y_i)$ ,  $\Psi_2^{(1)} = \hat{\beta}_{Y,i} - \Phi_2(X_i, Y_i)$ . Применяя технику АКАР, получим:

$$\begin{aligned} u_{1,i}^A &= -\hat{f}_{X,i} - v_{1,i} + \Phi_{1,i+1} - \lambda_1 \hat{\beta}_{X,i} + \lambda_1 \Phi_{1,i}, \\ u_{2,i}^A &= -\hat{f}_{Y,i} - v_{2,i} + \Phi_{2,i+1} - \lambda_2 \hat{\beta}_{Y,i} + \lambda_2 \Phi_{2,i}. \end{aligned} \quad (13)$$

Затем декомпозируем систему (10) на многообразии  $\Psi^{(1)} = (\Psi_1^{(1)}, \Psi_2^{(1)}) = 0$ , получим с учетом (13):

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i (\alpha C_0 - \mu \beta_{X,i} X_i Y_i), \\ Y_{i+1} &= A (\alpha C_0 - \mu \beta_{Y,i} X_i Y_i), \\ v_{1,i+1} &= v_{1,i} + \eta_1 \Psi_{1i}, \\ v_{2,i+1} &= v_{2,i} + \eta_2 \Psi_{2i}. \end{aligned} \quad (14)$$

На следующем шаге введем макропеременные:  $\Psi_1^{(2)} = \Psi_1 + k_1 v_1$ ,  $\Psi_2^{(2)} = \Psi_2 + k_2 v_2$ ,  $k_j \neq 0, j = 1, 2$ .

Применяя технику АКАР с учетом (14) и ограничения  $\Psi^{(2)} = 0$ ,  $\Psi^{(2)} = (\Psi_1^{(2)}, \Psi_2^{(2)})$ , получим (12).

На рисунке 2 приведены результаты управления по реальным данным годовой отчетности двух предприятий, из которого следует, что все целевые установки  $Y_i = Y^0$ ,  $X_i = \rho Y_i$  выполнены, однако форма переходного и установившегося процессов зависит от вида оценок  $\hat{f}_{X,i}$ ,  $\hat{f}_{Y,i}$ .

Расчеты в условиях  $A = 10$ ,  $C_0 = 3000$ ,  $X_0 = 4$ ,  $Y_0 = 17$ ,  $\alpha = 56 \cdot 10^{-5}$ ,  $\beta_x = 7.3$ ,  $\beta_y = 7.5$ ,  $\mu = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $\rho = 0.61$ .

Выше приведенные примеры являются мотивирующими к постановке задачи управления, в которой указано правило выбора модели управления, сопоставленной частной оценке неопределенности в описании.

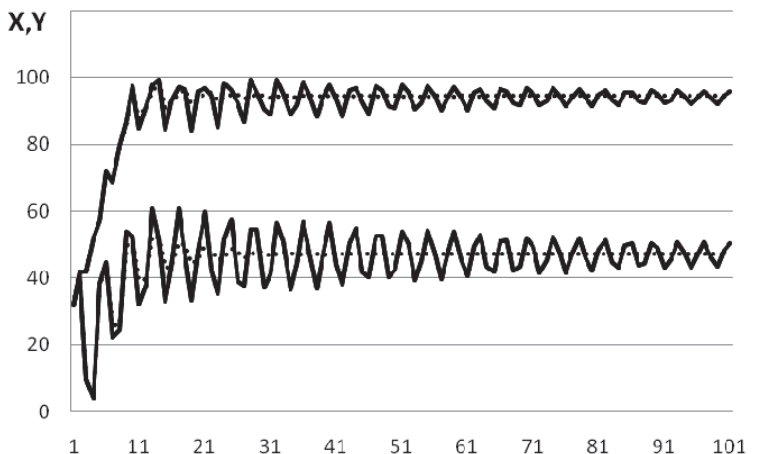


Рис. 2. Форма переходных процессов для переменных  $X_i, Y_i$  при разных аппроксимациях  $\hat{f}_{X,i}, \hat{f}_{Y,i}$  (короткий и длинный пунктир, соответственно)

Следует заметить следующее: нелинейная адаптация на заданном многообразии при выполнении определенных условий (в частности, существования АКАР-управления) обеспечивает достижение целевого множества при любой *допустимой* оценочной функции при условии ограниченности величин  $|\hat{f}_j - f_j| < \infty, j \in J, J \subseteq \{1, \dots, m\}$ , но «цена» соответствующих управлений в виде показателей качества переходного и установившегося процессов будет отличаться; тем самым системы управления, полученные на базе алгоритма из п. 3, допускают параметризацию в виде возможных вариантов оценок неизвестных фрагментов описания.

**5. Постановка задачи конструирования системы множественного управления.** Пусть имеется некоторое конечное множество векторов функций-оценок  $F = \left\{ \left( \hat{f}_1^{(j)}, \dots, \hat{f}_s^{(j)} \right) \right\}_{j=\overline{1, r}, s \leq m}$  для аппроксимации фрагментов неизвестных описаний  $f_1, \dots, f_s, s \leq m$  в правой части уравнений описания (в системах дифференциальных или разностных уравнений).

Согласно выше изложенному алгоритму синтеза системы управления для объекта с неполным описанием, множество оценок  $F$  порождает совокупность базовых алгоритмов конструирования управлений  $\{A_j\}_{j=\overline{1,r}}$  (п.3) и соответствующих моделей управлений  $\{U_j\}_{j=\overline{1,r}}$ , в каждой из которых используется  $j$ -й вектор оценочных функций  $\hat{f}^{(j)} = (\hat{f}_1^{(j)}, \dots, \hat{f}_s^{(j)})$  вместо неизвестных функций  $f_1, \dots, f_s$ , входящих в правые части уравнений, содержащих управляющие переменные (здесь остановимся только на этом случае).

Обозначим через  $U_j(t)$   $j$ -ю модель управления, «активную» в момент времени  $t$ , что означает следующее: векторное управление  $u^{(j)}(t) = u^{A(j)}(t) + \eta \psi^{(j)}(t)$ ,  $\eta \in R^m$ , которому подвергается объект в момент времени  $t$ , вычисляется по алгоритму  $A_j$ , согласно которому решение задачи  $\Phi_C^{(j)} = \int_0^\infty \sum_{i=1}^m \left( (\omega_i^{(j)} \dot{\psi}_i^{(j)})^2 + (\psi_i^{(j)})^2 \right) dt \rightarrow \min, 0 < \omega_i < \infty$  при ограничении  $\psi^{(j)} = (\psi_1^{(j)}, \dots, \psi_m^{(j)}) = (0, \dots, 0)$ ,  $j = \overline{1,r}$  обеспечивает составляющая  $u^{A(j)}(t)$ . Здесь дополнительный индекс  $j$  указывает на номер используемого алгоритма  $A_j$  (для непрерывной и дискретной моделей описания).

Ставится задача нахождения решающего правила выбора модели управления  $U_{j_0}(t)$ , обеспечивающего выполнение требования: управление  $U_{j_0}(t)$  доставляет экстремум некоторому функционалу качества  $Q(t)$  системы множественного управления, вычисленного по апостериорной информации, накопленной к моменту времени  $t$ ,  $U_{j_0}(t) = \arg \text{extr} Q(t)$ .

**6. Решение задачи конструирования системы множественного управления.** Применим алгебраический подход (Ю.И. Журавлев) (например, [27]) к синтезу корректных алгоритмов, идейно близкий к трудам Шеннона («надежные схемы из ненадежных реле») или Неймана («надежная система из ненадежных элементов»).

Определяем частные показатели эффективности системы управления  $C_k^{(j)}(t)$ , где  $C_k^{(j)}(t)$  — значение  $k$ -го показателя качества



для  $j$ -й модели управления в момент времени  $t$ , отражающего  $k$ -ю апостериорную характеристику ( $j = \overline{1, r}, k = \overline{1, K}$ ).

Набор показателей качества отдельного базового управления определяется экспертом и может включать величины:

$$C_1^{(j)}(t) = \sum_{i=1}^m |\psi_i^{(j)}(t)|,$$

$$C_2^{(j)}(t) = \max_t \left\{ |\psi_1^{(j)}(t)|, \dots, |\psi_m^{(j)}(t)| \right\},$$

$$C_3^{(j)}(t) = \left( \sum_{i=1}^m |\psi_i^{(j)}(t)|^2 \right)^{1/2} \dots$$

где  $m$  — размерность векторного управления. Обобщая, определим:

$$C_k^{(j)}(t) = \|\psi^{(j)}(t)\|_{(k)}, \psi^{(j)}(t) = (\psi_1^{(j)}(t), \dots, \psi_m^{(j)}(t)), \quad (15)$$

где  $\|y\|_{(k)}$  —  $k$ -я норма вектора  $y$  в векторном конечномерном пространстве  $\{\psi^{(j)}(t)\}$ .

На входе ниже следующего алгоритма должны быть определены: описание цели управления  $\psi = 0, \psi = (\psi_1, \dots, \psi_m)$ , где  $\psi_i, i = \overline{1, m}$  — макропеременные,  $m$  — размерность векторного управления; множества  $F, \{A_j\}_{j=\overline{1, r}}$ .

*Этап 1.* Применяем алгоритм из п. 3 для построения моделей управления  $\{U_j\}_{j=\overline{1, r}}$ .

*Этап 2.* Вычисляем весовые коэффициенты  $\rho_j(t, \tau, s)$  частных критериев (15) с учетом «горизонта памяти»  $(\tau, t]$  (длительности накопления апостериорной информации, порождаемой динамикой управляемого объекта).

Содержательно коэффициент регуляризации  $\rho_j(t, \tau, s) \in [0, 1]$  характеризует текущее значение «уровня доверия» к активному управлению  $U_j(s), s \in (\tau, t]$ ; величина  $\tau$  характеризует размер горизонта накопления показателей качества управления  $C^{(j)}(t)$ . В наиболее простом случае (например, [28]) можно полагать  $\rho_j(t, \tau, s) = \theta_j^{t-s+1}, \theta_j \in [0, 1]$ .

Этап 3. Вычисляем итоговый показатель эффективности моделей управления  $U_j, j = \overline{1, r}$  по формулам:

$$\begin{aligned} Q_C^{(j)}(t) &= \sum_{k=1}^K \int_{\tau}^t \rho_k(t, \tau, s) C_k^{(j)}(s) ds, j = \overline{1, r}, \\ Q_D^{(j)}(t) &= \sum_{k=1}^K \sum_{s=\tau}^t \rho_k(t, \tau, s) C_k^{(j)}(s), j = \overline{1, r}, \end{aligned} \quad (16)$$

для непрерывного и дискретного управлений соответственно.

Принимаем решение относительно номера модели управления, претендующего на роль активного управления в момент времени  $t$  по правилу:

$$u(t) = \sum_{j=1}^k \chi_j U_j(t), \chi_j = \begin{cases} 1, j = j_0, \\ 0, j \neq j_0, \end{cases} j_0 = \arg \min_{j=1, k} Q_{C(D)}^{(j)}(t). \quad (17)$$

Согласно алгебраической теории синтеза корректных алгоритмов [27], управление, получаемое по формуле (17), называется корректной композицией управлений  $\{U_j\}_{j=\overline{1, r}}$ , то есть обеспечивающей наилучшее качество процесса управления (рисунок 3) при фиксированном множестве базовых управлений  $\{U_j\}_{j=\overline{1, r}}$  и критерии качества (16).

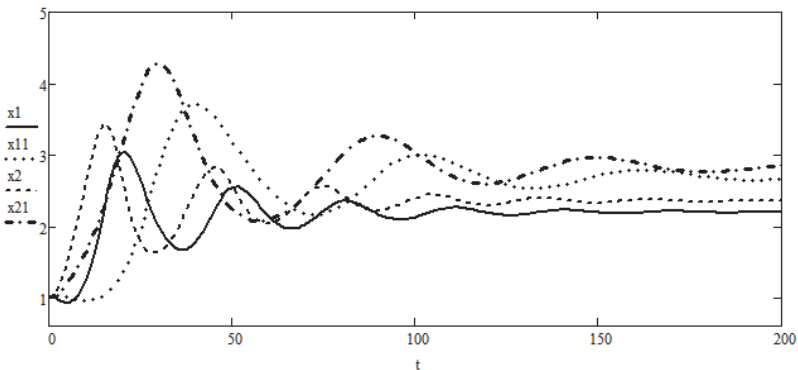


Рис. 3. Форма процессов для переменных  $x_1, x_2$  при отдельных управлениях (длинный пунктир и точечный пунктир) и выбранных «наилучших» (сплошное начертание и короткий пунктир) по правилу (5)

**7. Заключение.** В статье реализован алгоритм конструирования управления нелинейными объектами с компенсацией неопределенно-

сти в описании, идейно восходящий к созданию «регулятора с полной компенсацией» [23].

Изложенный подход построения «коллектива» управлений применим не только для случая, рассмотренного в статье. Множество базовых управлений могут быть сконструированы на основе методов обхода интегратора или управления в скользящем режиме.

Выбор примеров, рассмотренных в статье, не случаен и отражает факт применимости методов адаптации на многообразиях не только для задач технических [4, 9, 10], но и задач социогуманитарной и экономической направленности, поскольку объекты в этих областях подпадают под описание «сложных» объектов [29], моделирование которых с достаточной степенью уверенности не представляется возможным.

Результаты работы предполагается использовать при создании системы поддержки принятия решений при решении задач управления в экономических приложениях, а также при конструировании системы интеллектуального управления плохо формализуемыми объектами. Такие объекты возникают в прикладных исследованиях, когда затруднительно предусмотреть все динамические изменения (параметрические флуктуации, накопленная ошибка округления при оцифровке сигнала, ошибки измерений).

### Литература

1. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика. 1990. № 1. С. 3–28.
2. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах // СПб.: ЛКИ. 2008. 384 с.
3. Khalil H.K. Nonlinear systems // Prentice Hall. 2002. 750 p.
4. Колесников А.А. Синергетика и проблемы теории управления: сборник научных трудов // М.: Физматлит. 2004. 504 с.
5. Utkin V.I. Sliding modes in control and optimization // Springer. 2012. 237 p.
6. Sepulchre R., Jankovic M., Kokotovic P.V. Constructive nonlinear control // Springer Science & Business Media. 2012. 313 p.
7. Arcak M., Teel A., Kokotovic P. Robust nested saturation redesign for systems with input unmodeled dynamics // Proceedings of the 2000 American Control Conference. 2000. vol. 1. no. 6. pp. 150–154.
8. Astolfi A., Karagiannis D., Ortega R. Nonlinear and Adaptive Control with Applications // Springer Science & Business Media. 2008. 290 p.
9. Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом // М.: Физматлит. 2013. 193 с.
10. Andrievskii B.R., Fradkov A.L. Control of Chaos: Methods and Applications. II. Applications // Automation and Remote Control. 2004. vol. 65. no. 4. pp. 505–533.
11. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой: синтез скалярных и векторных систем по состоянию и по выходу // Нелинейная динамика и управление. // М.: Физматлит. 2006. Вып. 5. С. 5–24.
12. Narendra K.S., Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models // IEEE Trans. on Automatic Control. 1997. vol. 42. no. 2. pp. 171–187.
13. Yan X.G. et al. Decentralised control for complex systems – an invited survey // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2014. vol. 22. no. 4. pp. 285–297.

14. *Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Yusupov R.M., Merkur'yev Y.A.* Multiple models of information fusion processes: quality definition and estimation // *Journal of Computational Science*. 2014. vol. 5. no. 3. pp. 380–386.
15. *Narendra K.S., Han Z.* A new approach to adaptive control using multiple models // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2012. vol. 26. no. 8. pp. 689–820.
16. *Narendra K.S., Wang Y., Mukhopadhyay S.* Fast Reinforcement Learning using multiple models // *IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*. 2016. pp. 7183–7188.
17. *Ioannou P.A. et al.* L1-Adaptive Control: Stability, Robustness, and Interpretations // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2014. vol. 59. no. 11. pp. 3075–3080.
18. *Narendra K.S., Harshangi P.* Unstable systems stabilizing each other through adaptation // *American Control Conference (ACC)*. 2015. pp. 856–861.
19. *Haisen K., Wenrui L.* Adaptive control using multiple models without switching // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2013. vol. 53. no. 2. URL: <http://www.jatit.org/volumes/Vol53No2/11Vol53No2.pdf>. (дата обращения: 02.10.2017).
20. *Chen L., Narendra K.S.* Intelligent Control Using Neural Networks and Multiple Models // URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=4C8D357D68BA09DA6AF50CC3BC4C27A9?doi=10.1.1.19.9261&rep=rep1&ure=pdf> (дата обращения: 02.10.2017).
21. *Isidori A.* Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2010. vol. 18. pp. 693–714.
22. *Колесникова С.И.* Алгоритм синтеза системы управления многомерным плохо формализуемым объектом // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 5. С. 211–220.
23. *Щипанов Г.В.* Теория, расчет и методы проектирования автоматических регуляторов // *Автоматика и телемеханика*. 1939. № 1. С. 49–66.
24. *Галуллин А.С.* Обратные задачи динамики и задачи управления движениями материальных систем // *Дифференц. уравнения*. 1972. Т. 8. С. 1535–1541.
25. *Kolesnikova S.I.* Nonlinear regulator with disturbance compensation // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2015. vol. 51. no. 4. pp. 104–113.
26. *Шаповалов В.И.* Моделирование синергетических систем: Метод пропорций и другие математические методы // *Перспектив*. 2015. 136 с.
27. *Абламейко С.В. и др.* Практические алгоритмы алгебраической и логической коррекции в задачах распознавания по прецедентам // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2014. Т. 54. № 12. С. 1979–1993.
28. *Воронцов К.В.* Прогнозирование временных рядов URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/c/cb/Voron-ML-forecasting-slides.pdf> (дата обращения: 02.10.2017).
29. *Zhang W.B.* Synergetic Economics: Time and Change in Nonlinear Economics // *Springer Science & Business Media*. 2013. 246 p.

**Колесникова Светлана Ивановна** — д-р техн. наук, профессор кафедры высшей математики и математического моделирования факультета прикладной математики и кибернетики, Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ). Область научных интересов: интеллектуальный анализ данных, интеллектуальные системы управления, управление нелинейными объектами с неопределенностью в описании и их применение в технических и экономических исследованиях. Число научных публикаций — 60. [skolesnikova@yandex.ru](mailto:skolesnikova@yandex.ru); пр. Ленина, 36, Томск, 634050; р.т.: +7(3822)528453, Факс: +7(3822)529585.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-00920-а).

S.I. KOLESNIKOVA  
**A MULTIPLE CONTROL SYSTEM FOR A NON-LINEAR OBJECT  
 WITH UNCERTAINTY**

---

*Kolesnikova S.I. A Multiple Control System for a Non-Linear Object with Uncertainty.*

**Abstract.** We propose an algebraic approach to constructing a multiple control system for nonlinear multidimensional objects with chaotic regimes. The purpose of control is to output an object to an analytically prescribed stable state. Two variants of the continuous and discrete description of control objects are considered. The controlled objects are presented as a system of ordinary non-linear differential or difference equations with chaotic behavior in the case of certain combinations of parameters. Part of the objects description may be unknown. The suggested control algorithm is realized on the basis of methods of nonlinear control on manifolds, Lyapunov functions and the algebraic approach to the synthesis of correct algorithms. Two applied problems of economic orientation with continuous and discrete models of description are considered. Numerical modeling was carried out on real data of small enterprises. The results of the paper are expected to be used in the system of economic decision-making support.

**Keywords:** non-linear multidimensional object, poorly formalized object, target manifold, multiple control, collective of control algorithms.

---

**Kolesnikova Svetlana Ivanovna** — Ph.D., Dr. Sci., professor of higher mathematics and mathematical modeling department of applied mathematics and cybernetics faculty, National Research Tomsk State University (NR TSU). Research interests: intellectual data analysis, intelligent control systems, control of nonlinear objects with uncertainty in the description and their application in technical and economic studies. The number of publications — 60. skole-snikova@yandex.ru; 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; office phone: +7(3822)528453, Fax: +7(3822)529585.

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grant 17-08-00920-a).

### References

1. Krasovskiy A.A. [Problems of Control Physical Theory]. *Avtomatika i telemekhanika – Automatic and Telemechanic*. 1990. vol. 1. pp. 3–28. (In Russ.).
2. Tyukin I.Yu., Terekhov V.A. *Adaptaciya v nelinejnyh dinamicheskikh sistemah* [Adaptation in nonlinear dynamical systems]. SPb.: LKI. 2008. 384 p. (In Russ.).
3. Khalil H.K. *Nonlinear systems*. Prentice Hall. 2002. 750 p.
4. Kolesnikov A.A. *Sinergetika i problemy teorii upravlenija: sbornik statej* [Synergetics and problems of control theory: Collected articles]. M.:Fizmatlit. 2004. 504 p. (In Russ.).
5. Utkin V.I. *Sliding modes in control and optimization*. Springer. 2012. 237 p.
6. Sepulchre R., Jankovic M., Kokotovic P.V. *Constructive nonlinear control*. Springer Science & Business Media. 2012. 313 p.
7. Arcak M., Teel A., Kokotovic P. Robust nested saturation redesign for systems with input unmodeled dynamics. *Proceedings of the 2000 American Control Conference*. 2000. vol. 1. no. 6. pp. 150–154.
8. Astolfi D., Karagiannis R., Ortega R. *Nonlinear and Adaptive Control with Applications*. Springer. 2008. 290 p.
9. Kolesnikov A.A. *Novyye nelinejnye metody upravlenija poletom* [New nonlinear methods of flight control]. M.: Fizmatlit. 2013. 193 p. (In Russ.).
10. Andrieviskii B.R., Fradkov A.L. *Control of Chaos: Methods and Applications. II. Applications. Automation and Remote Control*. 2004. vol. 65. no. 4. pp. 505–533.
11. Emel'yanov S.V. [Automatic control systems with variable structure: synthesis of scalar and vector systems by state and by output. Collected articles]. *Nelinejnaya*

- dinamika i upravlenie – Nonlinear dynamics and control*. 2006. vol. 5. pp. 5–24. (In Russ.).
12. Narendra K.S., Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models. *IEEE Trans. on Automatic Control*. 1997. vol. 42. no. 2. pp. 171–187.
  13. Yan X.G. et al. Decentralised control for complex systems – an invited survey. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2014. vol. 22. no. 4. pp. 285–297.
  14. Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Yusupov R.M., Merkurjev Y.A. Multiple models of information fusion processes: quality definition and estimation. *Journal of Computational Science*. 2014. vol. 5. no. 3. pp. 380–386.
  15. Narendra K.S., Han Z. A new approach to adaptive control using multiple models. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2012. vol. 26. no. 8. pp. 689–820.
  16. Narendra K.S., Wang Y., Mukhopadhyay S. Fast Reinforcement Learning using multiple models. Proceedings of IEEE International 55th Conference on Decision and Control (CDC). 2016. pp. 7183–7188.
  17. Ioannou P.A. et al. L1-Adaptive Control: Stability, Robustness, and Interpretations. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2014. vol. 59. no. 11. pp. 3075–3080.
  18. Narendra K.S., Harshangi P. Unstable systems stabilizing each other through adaptation. Proceedings of American Control Conference (ACC). 2015. pp. 856–861.
  19. Haisen K., Wenrui L. Adaptive control using multiple models without switching. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2013. vol. 53. no. 2. Available at: <http://www.jatit.org/volumes/Vol53No2/11Vol53No2.pdf>. (accessed: 02.10.2017).
  20. Chen L., Narendra K.S. Intelligent Control Using Neural Networks and Multiple Models. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=4C8D357D68BA09DA6AF50CC3BC4C27A9?doi=10.1.1.19.9261&rep=rep1&type=pdf>. (accessed: 02.10.2017).
  21. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2010. vol. 18. pp. 693–714.
  22. Kolesnikova S.I. [Algorithm for the synthesis of a control system for a multi-dimensional poorly-formalized object]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki – News of SFedU. Technical science*. 2015. vol. 5. pp. 211–220. (In Russ.).
  23. Shipanov G.V. [The theory of the calculation and design methods of automatic regulators]. *Avtomatika i telemekhanika – Automatic and Telemekhanic*. 1939. vol. 1. pp. 49–66. (In Russ.).
  24. Galiullin A.S. [Inverse problems of dynamics and control problems of motions of material systems]. *Differencial'nye uravnenija – Differential equations*. 1972. Issue 8. pp. 1535–1541. (In Russ.).
  25. Kolesnikova S.I. Nonlinear regulator with disturbance compensation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2015. vol. 51. no. 4. pp. 104–113.
  26. Shapovalov V.I. *Modelirovanie sinergeticheskikh sistem: Metod proporcij i drugie matematicheskie metody* [Modeling of synergetic systems: The method of proportions and other mathematical methods]. Prospekt. 2015. 136 p. (In Russ.).
  27. Ablameiko S.V. et al. [Practical Algebraic and Logical Correction Algorithms in Recognition Problems Using Precedents]. *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki – Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2014. Issue 54. vol. 12. pp. 1979–1993. (In Russ.).
  28. Vorontsov K.V. Forecasting time series. Available at: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/c/cb/Voron-ML-forecasting-slides.pdf>. (accessed: 02.10.2017). (In Russ.).
  29. Zhang W.B. *Synergetic Economics: Time and Change in Nonlinear Economics*. Springer Science & Business Media. 2013. 246 p.

Д.В. УЧАЕВ, И.Г. ЖУРКИН, Д.М.В. УЧАЕВ  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОМЕНТОВ ЧЕБЫШЕВА В ЗАДАЧАХ  
ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ В ПОЛЯХ  
ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ**

---

*Учаев Д.В., Журкин И.Г., Учаев Д.М.В.* **Использование моментов Чебышева в задачах подавления высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий.**

**Аннотация.** Работа посвящена вопросу повышения качества аномальных гравитационных полей путем снижения уровня содержащихся в них высокочастотных помех. Приведен краткий обзор существующих подходов и методов подавления высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий. Предложен метод фильтрации полей гравитационных аномалий, основанный на преобразовании, выполняемом в области моментов Чебышева. Приведены эмпирически установленные значения коэффициентов предложенного фильтра, использование которых оказывается целесообразным при неизвестном уровне помех. На примере смоделированной карты аномалий гравитационного поля продемонстрировано, что предложенный фильтр подавления помех сопоставим по скорости и превосходит по качеству результата такие фильтры, как билатеральный фильтр, вейвлет-фильтр, фильтры нелокального усреднения, а также хорошо зарекомендовавший себя в практике предварительной обработки гравитационных полей фильтр Винера.

**Ключевые слова:** гауссовская помеха, моменты Чебышева, гравитационная аномалия, подавление помех.

---

**1. Введение.** В геофизике гравитационными аномалиями (аномалиями гравитационных полей) принято считать отклонения величины гравитационного поля от расчетной, вычисленной на основе той или иной математической модели [1]. Гравитационные аномалии Земли подразделяются на региональные и локальные аномалии. Региональные аномалии занимают сравнительно большие по площади территории (в десятки и сотни тысяч кв. км.) и обусловлены, как правило, крупными образованиями в земной коре и верхней мантии. Локальные (или местные) аномалии, как правило, связаны со сравнительно небольшими по размерам структурами осадочного чехла или кристаллического фундамента, с отдельными геологическими телами, и в том числе с месторождениями различных полезных ископаемых. Аномалии гравитационного поля Земли оказывают существенное влияние на орбиты космических аппаратов, траектории полета ракет, работу навигационных систем, формирование течений и колебания уровня Мирового океана, результаты геофизических исследований.

Задачи геоинформационного моделирования и интерпретации гравитационных аномалий чрезвычайно разнообразны. Однако решению данных задач довольно часто препятствует то, что значения аномальных гравитационных полей осложнены высокочастотными помехами различного происхождения. Наличие помех приводит к тому, что

создаваемые геоинформационные модели оказываются недостаточно точными для получения достоверных прогнозов на их основе, а формальное решение интерпретационных задач геофизики может и вовсе не существовать, поскольку помехи препятствуют идентификации геологических объектов и определению их параметров по аномальному полю. В качестве примера на рисунке 1а показана гравитационная аномалия, вызванная влиянием модельного рудного тела в форме шара, вычисленная по следующей формуле [2]:

$$g(x, z) = \frac{4}{3} \pi G \sigma R^3 \left\{ \frac{z}{\left[ (x - x_0)^2 + z^2 \right]^{3/2}} \right\},$$

где  $R$  — радиус шара,  $x_0$  — координата центра шара вдоль горизонтального направления,  $z$  — глубина погружения центра шара,  $G$  — универсальная гравитационная постоянная,  $\sigma$  — контраст между плотностью тела и вмещающей среды.

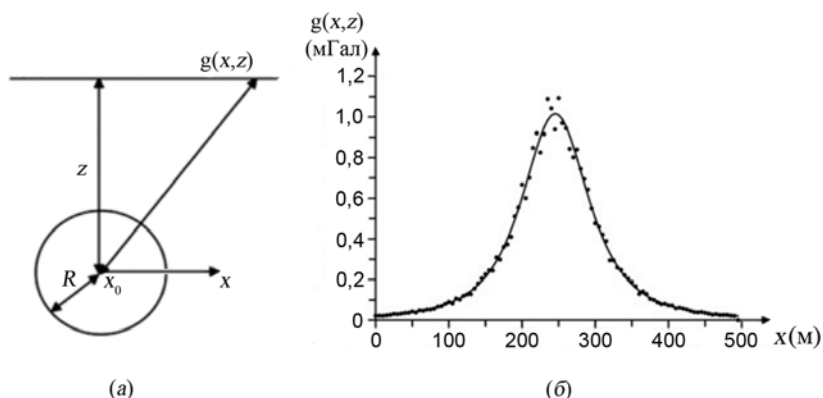


Рис. 1. Схема, демонстрирующая положение и параметры модельного сферического рудного тела (а) и соответствующая ему гравитационная аномалия: без помех (сплошная линия) и с высокочастотными помехами (точки) (б) [2]

Как видно из рисунка 1б, наличие высокочастотных помех в аномальном гравитационном поле приводит к тому, что решение обратной задачи для данного случая в классе шаров не существует. Иными словами, не существует такого шара, который мог бы создать данную многоэкстремальную аномалию и, следовательно, при определении параметров шара по аномальному полю вычисленные значения параметров модели будут отличаться от истинных значений.



Между тем следует учитывать то, что понятие помехи во многом условно и зависит от определения региональной и локальной составляющих аномального гравитационного поля. Иными словами, одна и та же аномалия, в зависимости от конкретной решаемой задачи, может быть и региональной, и локальной, и даже случайной компонентой (помехой) [3]. При этом возможность восстановления локальных аномалий или подавления случайных компонент во многом зависит от плотности съемочной сети и величины отношений амплитуд полезных аномалий на фоне остальных.

Данная проблема особенно актуальна при обработке данных градиентометрии, обладающих высоким пространственным разрешением по сравнению с данными обычной гравиметрической съемки. Стандартная обработка данных гравиразведки обоих видов предполагает применение ряда алгоритмов для подавления нежелательных высокочастотных помех и выделения на их фоне геологически значимых сигналов. Однако, подвергнутые такой обработке данные часто все еще содержат высокий уровень высокочастотных помех, препятствующий их количественной и качественной интерпретации [4]. Помочь в решении этой проблемы может предлагаемый в данной работе низкочастотный фильтр. Данный фильтр является модификацией предложенного в работе [5] многомасштабного фильтра улучшения качества изображений в области моментов Чебышева, уже продемонстрировавшего высокую эффективность при решении таких задач, как восстановление потерявших цвет фотоснимков [6] и удаление шумов в изображениях, получаемых сканирующим электронным микроскопом [7].

Далее статья организована следующим образом. В разделе 2 описаны виды и источники высокочастотных помех, возникающих в процессе гравиразведки и присутствующих в полях гравитационных аномалий. В разделе 3 приводится краткий обзор подходов и методов, используемых для подавления неучтенных в процессе съемки высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий. В разделе 4 приводится краткая информация о моментах Чебышева и их свойствах. В разделе 5 представлен фильтр подавления высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий в области моментов Чебышева. Экспериментальная апробация предлагаемого фильтра на комплексном модельном примере продемонстрирована в разделе 6. В этом же разделе описаны результаты сравнения предлагаемого фильтра с другими популярными фильтрами подавления высокочастотных помех. И наконец, в заключении (разделе 7) подведены обобщающие выводы всей работы.

**2. Высокочастотные помехи в полях гравитационных аномалий.** В общем случае все высокочастотные помехи, присутствующие на фоне региональных и локальных аномалий, могут быть разделены на три класса: высокочастотные помехи аппаратурно-методического, сейсмического и геологического происхождения.

Помехи аппаратурно-методического происхождения обусловлены несовершенством применяемой при полевых исследованиях аппаратуры и методикой съемки.

Помехи сейсмического происхождения могут быть вызваны природными (землетрясения, микросейсмические колебания и т.п.) или техногенными (промышленный шум, движущийся автотранспорт и т.п.) факторами.

Помехи геологического происхождения подразделяются на следующие две основные группы: высокочастотные помехи, вызываемые неоднородностью верхней части геологической среды (фактически, локальные аномалии, которые при данных условиях съемки не могут быть отличимы от случайной помехи) и поля, создаваемые соседними объектами.

Помехи первого класса могут быть частично учтены в процессе съемок путем вычисления среднеквадратической погрешности аномальных значений. Сведения о соседних по отношению к изучаемому объектах также довольно часто доступны и могут быть учтены в процессе построения и анализа полей гравитационных аномалий. Поэтому наибольшую сложность представляют неучтенные высокочастотные помехи аппаратурно-методического происхождения, а также высокочастотные помехи сейсмического происхождения и помехи, вызываемые неоднородностью верхней части геологической среды, свойства которых в большинстве случаев неизвестны. Данное обстоятельство вынуждает интерпретатора считать эти помехи случайными и описывать их статистически. При этом в большинстве случаев данные помехи моделируются случайным гауссовским распределением, а среди всего множества методов подавления помех выбираются те, которые показывают хорошие результаты при подавлении гауссовских помех.

**3. Обзор современных методов подавления высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий.** Проблема подавления высокочастотных помех исследовалась во множестве работ как применительно к данным гравиметрической съемки, так и в отношении результатов градиентометрической съемки. При этом можно выделить два основных подхода к решению данной задачи.

В первом подходе уменьшение уровня высокочастотных помех производится исходя из чисто физических соображений. Большинство такого рода методов нашли применение при обработке данных градиентометрии. Так Уайл и другие в работе [8] предложили тест на внутреннюю согласованность гравитационных градиентов путем анализа их спектров мощности. Этот метод позволяет определить, какая часть спектра мощности не связана с источниками гравитационных аномалий, и как следствие, может быть подвергнута фильтрации. К сожалению, на практике данный метод может приводить к существенным ошибкам, поскольку основан на предположениях, выдвигаемых в отношении источников анома-

лий, которые в случае реальных данных могут оказаться ложными. Другой метод предполагает одновременное уменьшение шума из наблюдаемых значений силы тяжести и полного тензора градиента гравитационного поля путем их согласованной реконструкции. Такой метод был предложен в работе Пажота и других [9] в 2008 году. Данный метод не требует априорной информации и позволяет задействовать всю получаемую информацию о гравитационном поле исследуемого региона. Позднее в 2013 году Юан и другие [10] применили уравнение Лапласа и ряды Фурье для удаления шума в измеренных данных градиентометрии. Метод, изложенный в работе [10], также как и метод, описанный в работе [9], демонстрирует хорошие результаты на модельных и реальных данных, однако требует дополнительной обработки исходных данных в случаях, когда пункты наблюдения не лежат в узлах регулярной решетки. В работе Мартинеза и Ли [11] это ограничение было снято благодаря использованию метода эквивалентных источников. Однако процедура фильтрации, изложенная в работе [11], является весьма затратной в вычислительном плане и подходит только для фильтрации полей гравитационных аномалий, создаваемых по результатам градиентометрии.

Другим подходом к подавлению высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий является применение низкочастотных фильтров общего назначения к двумерным изображениям картируемых аномалий. В данном подходе изображения гравитационных аномалий рассматриваются как полутоновые или цветные изображения, содержащие сочетание полезного сигнала и помехи. В такой интерпретации рассматриваемая в данной статье задача превращается в классическую задачу цифровой обработки изображений, для решения которой могут быть использованы цифровые помехоподавляющие фильтры с бесконечной [12] (например, РС-фильтр [13]) или конечной (например, фильтр Савицкого-Голея [14]) импульсной характеристикой [15]. Среди всего множество фильтров данной группы, наибольшее распространение при решении рассматриваемой в статье задачи получили фильтр Баттерворта [16] и фильтр Винера [17]. Данные фильтры относительно просты в своей реализации и могут быть настроены под конкретные нужды пользователя. Однако в этом кроется и их недостаток: наличие настраиваемых параметров приводит к тому, что результаты, получаемые с помощью данных фильтров, существенно зависят от опыта пользователя и не могут рассматриваться как объективные. Данный недостаток практически полностью отсутствует у метода фильтрации, основанного на интерполяционной процедуре кригинг. В работе [4] показано, что данный метод может использоваться как эффективная альтернатива перечисленным выше шумоподавляющим фильтрам. В целом указанные выше цифровые фильтры позволяют существенно уменьшить уровень помех в полях гравитационных аномалий, однако их применение сопровождается сглаживанием границ и подавлением локальных аномалий

гравитационных полей. Минимизировать вероятность появления данного вида искажений позволяют специальные фильтры, сохраняющие контура при сглаживании, в число которых входят вейвлет-фильтры подавления помех [18-22] и фильтры нелокального усреднения [21, 23, 24]. Вейвлет-фильтры подавления помех в отличие от частотных фильтров пространственно локализованы. Это означает, что области аномальных гравитационных полей с низким уровнем помех будут подвергаться подавлению помех в меньшей степени, чем сильно зашумленные области. Это позволяет существенно снизить риск фильтрации локальных аномалий гравитационных полей. Наибольшее распространение сегодня для решения рассматриваемой задачи получили вейвлет-фильтры, в которых подавление помех происходит за счет приведения к нулю вейвлет-коэффициентов, отвечающих за высокочастотные помехи. Процедура подавления помех в подходе к фильтрации, основанном на теории вейвлетов, главным образом зависит от выбора обнуляющей функции и порога обнуления вейвлет-коэффициентов [21]. Недостаток фильтров данного типа состоит в том, что при высоком уровне помех данные фильтры могут приводить к появлению так называемых ложных аномалий гравитационных полей.

Фильтры нелокального усреднения используют преимущества большой степени избыточности цифровых изображений. Основная идея, лежащая в основе данных фильтров, заключается в том, что подавление помех в зашумленном изображении осуществляется с использованием всех пикселей зашумленного изображения с учетом специальным образом рассчитанных весовых коэффициентов этих пикселей. Оригинальный фильтр нелокального усреднения, предложенный в 2005 году, обладал большим недостатком — высокой вычислительной сложностью. Позднее были предложены различные оптимизации данного фильтра, позволяющие значительно уменьшить время обработки исходных изображений [23, 24]. Эти оптимизации сделали возможным использовать фильтры нелокального усреднения в большинстве практических задач, включая обработку полей гравитационных аномалий. Однако качество восстанавливаемых с их помощью двумерных сигналов сильно зависит от выбора процедуры оптимизации.

Таким образом, задача поиска наилучшего фильтра для подавления высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий по-прежнему является актуальной. В данной работе для этих целей используются моменты Чебышева, обладающие уникальным набором свойств.

**4. Моменты Чебышева и их свойства.** Моменты Чебышева были впервые введены в работе [25] и для изображения размером  $N \times N$  рассчитываются по формуле:

$$T_{p,q} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \tilde{t}_p(x) \tilde{t}_q(y) f(x, y),$$

где  $p, q = 0, 1, \dots, N-1$ ,  $\tilde{t}_p$  и  $\tilde{t}_q$  — соответствующим образом нормированные полиномы Чебышева, введенные в работе [25] и вычисляемые с использованием следующего рекуррентного соотношения [26]:

$$\tilde{t}_p(x) = \gamma_1 \tilde{t}_p(x-1) + \gamma_2 \tilde{t}_p(x-2),$$

в котором  $\gamma_1 = \frac{-p(p+1) - (2x-1)(x-N-1) - x}{x(N-x)}$ ,  $\gamma_2 = \frac{(x-1)(x-N-1)}{x(N-x)}$ ,  $x = 2, 3, \dots, N/2$ ,  $p = 1, 2, \dots, N-1$ , а начальные значения  $\tilde{t}_p(0)$  и  $\tilde{t}_p(1)$  рассчитываются по формулам:

$$\tilde{t}_p(0) = -\sqrt{\frac{N-p}{N+p}} \sqrt{\frac{2p+1}{2p-1}} \tilde{t}_{p-1}(0),$$

$$\tilde{t}_p(1) = \left\{ 1 + \frac{p(1+p)}{1-N} \right\} \tilde{t}_p(0),$$

где  $p = 1, 2, \dots, N-1$ .

Моменты Чебышева обладают тремя важными свойствами, определяющими их полезность для решения задач, связанных с подавлением помех в цифровых изображениях:

– ортогональность: моменты Чебышева обладают ортогональным базисом, поскольку определяются через нормированные полиномы Чебышева, образующие ортогональную систему полиномов. Данное свойство позволяет производить фильтрацию цифровых изображений непосредственно в области моментов Чебышева с последующей реконструкцией отфильтрованного изображения. Это свойство делает моменты Чебышева гораздо более удобными в использовании, чем неортогональные моменты, к числу которых можно отнести геометрические, комплексные и вейвлет-моменты [27]. Более того, неортогональные моменты старших порядков чувствительны к шуму, а полный набор неортогональных моментов обладает высокой степенью информационной избыточности.

– интерпретируемость: моменты Чебышева малых порядков отвечают за низкочастотные, а старших порядков — за высокочастотные компоненты изображения. Для примера на рисунке 2 продемонстрированы графики функции ядра моментов Чебышева

$\Phi_{p,q}(x, y) = \tilde{t}_p(x)\tilde{t}_q(y)$  при  $p = q = 2$  и  $p = q = 10$ . Как видно из данного рисунка, значения функции  $\Phi_{10,10}$  меняются гораздо сильнее, чем значения функции  $\Phi_{2,2}$ ;

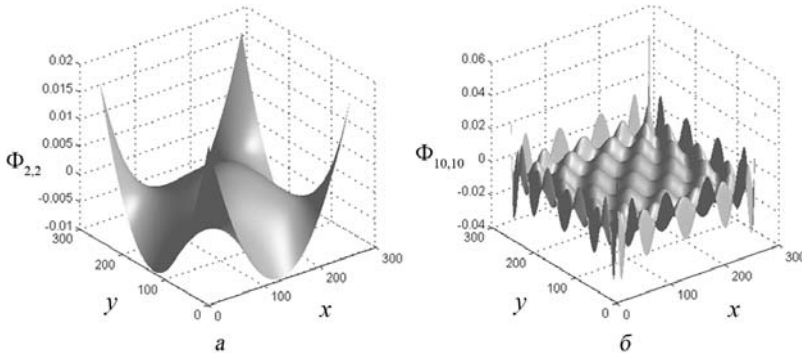


Рис. 2. Ядра моментов: а)  $T_{2,2}$ ; б)  $T_{10,10}$

– использование в качестве базисных функций дискретных полиномов. Базисы дискретной переменной наиболее естественны для применения на ЭВМ и в то же время свободны от недостатков, присущих дискретным ортогональным системам, построенным из кусочно-постоянных недифференцируемых функций (типа функций Хаара, Уолша, Адамара и др.) и непрерывным ортогональным системам (основанным, например, на полиномах Лежандра или Цернике). В частности, в отличие от базисов непрерывной переменной базисы дискретной переменной не требуют численного интегрирования сложных функциональных зависимостей, а в отличие от базисов, построенных из кусочно-постоянных недифференцируемых функций, — имеют аналитическое описание и, следовательно, допускают аналитические приемы в процессе обработки цифровых изображений. Кроме того, дискретные моменты по сравнению с непрерывными моментами более устойчивы к помехам в исходном изображении [28].

**5. Фильтр подавления высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий в области моментов Чебышева.** В данной работе для подавления высокочастотных помех в полях гравитационных аномалий предлагается проводить фильтрацию изображений полей гравитационных аномалий посредством следующего преобразования:

$$T'_{p,q} = \begin{cases} bT_{p,q}, & \text{для } (p, q) = (0, 0), \\ k\lambda^{-n}T_{p,q}, & \text{для } (p, q) \neq (0, 0), \end{cases} \quad (1)$$

где  $T_{p,q}$  — моменты Чебышева, рассчитываемые по изображению поля гравитационных аномалий;  $b$ ,  $k$  и  $\lambda$  — эмпирическим способом подбираемые положительные коэффициенты;  $n$  — номер частотного канала, формируемого моментами Чебышева  $T_{p,q}$  с такими  $p$  и  $q$ , что  $p + q = n$ ;  $\bar{\tau}_n$  — среднее арифметическое значение скейлинговых показателей  $\tau_{p,q}$  в  $n$ -ом канале, определяемых из соотношения:

$$|T_{p,q}^j| \propto 2^{-j\tau_{p,q}}, \quad (2)$$

где  $T_{p,q}^j$  — введенные в работе [29] многомасштабные моменты Чебышева, характеризующиеся значениями масштабного параметра  $j$  и совпадающие с моментами Чебышева  $T_{p,q}$  при  $j = 0$ . Значения скейлинговых показателей  $\tau_{p,q}$  из выражения (2) могут быть найдены путем оценки наклонов прямых (например, методом наименьших квадратов), аппроксимирующих зависимости  $\ln |T_{p,q}^j|$  от  $\ln 2^{-j}$  при фиксированных значениях параметров  $p$  и  $q$ .

Покажем теперь, что коэффициенты  $b$ ,  $k$  и  $\lambda$  в выражении (1) отвечают за яркость, контраст и резкость изображений соответственно. Для этого предположим, что какой-либо один из трех коэффициентов отличен от единицы, а два других равны единице. Положим сперва, что в выражении (1) коэффициент  $b$  отличен от единицы, а коэффициенты  $k$  и  $\lambda$  равны единице. Тогда из соотношения (1) вытекает, что преобразованию подвергается один лишь коэффициент  $T_{0,0}$ , отвечающий за среднее распределение яркости пикселей изображения. Следовательно, коэффициент  $b$  может отождествляться с коэффициентом яркости изображений.

Положим теперь, что в выражении (1) коэффициент  $k$  отличен от единицы, а коэффициенты  $b$  и  $\lambda$  равны единице. Воспользуемся в таком случае предложенной в работе [5] мерой контраста изображений в области моментов Чебышева. Для формирования данной меры разобьем матрицу коэффициентов Чебышева изображения на отличные друг от друга частотные каналы, где  $n$ -ый канал образован только теми коэффициентами  $T_{p,q}$ , для которых  $p + q = n$ . Тогда контраст  $c_n$  канала с номером  $n \geq 1$  может определяться как  $c_n = E_n / E_0$ , где  $E_n$  — среднее значение модулей коэффициентов Чебышева в  $n$ -ом канале:

$$E_n = \frac{1}{L_n} \sum_{p+q=n} |T_{p,q}|, \quad (3)$$

где  $L_n$  — количество коэффициентов Чебышева в  $n$ -ом канале.

Заметим теперь, что, поскольку справедливы соотношения (1) и (3), то связь между средними значениями модулей коэффициентов Чебышева, вычисленными для исходного ( $E_n$ ) и модифицированного ( $E'_n$ ) изображений имеет вид:  $E'_n = E_n$  при  $n = 0$  и  $E'_n = kE_n$  при  $n \geq 1$ . Следовательно, контраст  $c_n$   $n$ -ого канала исходного изображения и контраст  $c'_n$   $n$ -ого канала модифицированного изображения связаны друг с другом следующим образом:

$$c'_n = \frac{E'_n}{E'_0} = \frac{kE_n}{E_0} = kc_n. \quad (4)$$

Из соотношений (1) и (4) следует, что переумножение каждого из коэффициентов Чебышева на величину  $k > 0$  приводит в итоге к увеличению контраста в  $k$  раз. Следовательно, коэффициент  $k$  может отождествляться с коэффициентом контрастности изображений.

Положим теперь, что в выражении (1) коэффициент  $\lambda$  отличен от единицы, а коэффициенты  $b$  и  $k$  равны единице. Тогда из того, что справедливы соотношения (1) и (3) следует, что при  $n = 0$   $E'_n = E_n$ , а при  $n \geq 1$  имеет место следующая цепочка равенств:

$$E'_n = \frac{1}{L_n} \sum_{p+q=n} |T'_{p,q}| = \frac{1}{L_n} \sum_{p+q=n} |\lambda^{\bar{n}} T_{p,q}| = \lambda^{\bar{n}} \frac{1}{L_n} \sum_{p+q=n} |T_{p,q}| = \lambda^{\bar{n}} E_n,$$

из которой очевидным образом вытекает, что  $E'_n = \lambda^{\bar{n}} E_n$ .

Таким образом, связь между контрастами соответствующих каналов исходного и модифицированного изображений имеет вид:

$$c'_n = \frac{E'_n}{E'_0} = \frac{\lambda^{\bar{n}} E_n}{E_0} = \lambda^{\bar{n}} c_n. \quad (5)$$



Поскольку  $\bar{\tau}_n$  достаточно хорошо аппроксимируется монотонно возрастающей функцией аргумента  $n$ , то из соотношения (5) вытекает, что при  $\lambda > 1$  усиливается контраст высокочастотных компонент изображения (соответствующих контурам объектов на изображении, мало-размерным объектам и шуму), что в итоге ведет к увеличению резкости изображения. В свою очередь при  $0 < \lambda < 1$  контраст высокочастотных компонент изображения снижается, что в итоге приводит к сглаживанию изображений. Следовательно, коэффициент  $\lambda$  может отождествляться с коэффициентом резкости изображений.

В данной работе в ходе проведенных нами экспериментальных исследований было установлено, что для подавления гауссовских помех в гравитационных полях коэффициент резкости  $\lambda$  в выражении (1) следует брать меньшим 0,5: при этом, чем меньшее значение принимает коэффициент  $\lambda$  (то есть чем ближе к нулю  $\lambda$ ), тем менее зашумленным будет подвергнутое фильтрации поле. Кроме того, было установлено, что коэффициенты  $b$  и  $k$  при подавлении помех в полях гравитационных аномалий представляется целесообразным брать из диапазонов  $0,5 \div 1$  и  $0,8 \div 1,2$  соответственно.

**6. Экспериментальная проверка предложенного фильтра подавления помех.** С целью экспериментальной проверки предложенного фильтра были подвергнуты подавлению помех три смоделированные в пакете Potensoft [30] карты аномалий гравитационного поля T1, T2 и T3 размером  $500 \times 500$ ,  $250 \times 250$  и  $100 \times 100$  пикселей с использованием прямоугольных призм с высотами  $\Delta h$ , располагающихся на глубинах  $h$  от поверхности и характеризующихся плотностью  $\rho$  (таблица 1). Взаимное положение призматических тел выбиралось таким образом, чтобы создаваемые с их помощью карты гравитационных аномалий отражали типичные для реальных гравитационных полей ситуации. Например, рассмотрим рисунок 3а, на котором продемонстрирована одна из данных карт. Как видно из данного рисунка, аномалии, создаваемые призмами №4 и №5, существенно меньше по величине аномалий, порождаемых призмами №1, №2 и №3. Кроме того, аномалии, порождаемые призмами №2 и №3, накладываются на аномалию, создаваемую призмой №1. Данное расположение аномалий при наличии высокого уровня помех может приводить к сокрытию слабых локальных аномалий на фоне более сильных локальных или региональных аномалий.

Таблица 1. Модельные параметры призматических тел, используемых для построения тестовых карт аномалий

Номер призматического тела	Модельные параметры								
	$\Delta h$ (км)			$h$ (км)			$\rho$ (г/см <sup>3</sup> )		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	0,5	0,4	0,2	0,1	0,2	0,2	0,05	0,02	0,05
2	0,3	0,1	0,3	0,2	0,6	0,3	0,06	0,06	0,03
3	0,3	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1	0,02	0,04	0,05
4	0,6	0,2	0,4	0,1	0,7	0,4	0,04	0,08	0,04
5	0,3	0,1	0,4	0,4	0,1	0,2	0,03	0,03	0,04

Далее на смоделированные карты аномалий гравитационного поля накладывались реализации гауссовской помехи со средним значением 0 мГал и среднеквадратическим отклонением 0,22 мГал (для T1), 0,40 мГал (для T2) и 0,54 (для T3). Одно из полученных в итоге зашумленных полей гравитационных аномалий представлено в виде нормализованного полутонового изображения на рисунке 3б, где белый цвет соответствует нулю, а черный цвет — единице. Как видно из данного рисунка, высокий уровень наложенной помехи препятствует идентификации слабо выраженных аномалий поля, создаваемых призмами №3 и №5. Помимо этого в зашумленном изображении наблюдается характерный для такого уровня помех эффект размытия границ локальных гравитационных аномалий и появление отдельных всплесков, ярко выраженных на фоне остальной части изображения.

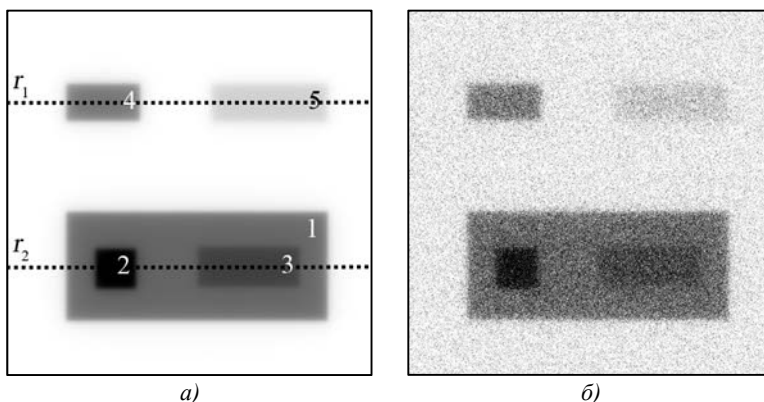


Рис. 3. Карта аномалий гравитационного поля T1 (а) и результат наложения на нее гауссовской помехи (б)

На следующем этапе апробации зашумленные изображения модельных гравитационных полей были подвергнуты фильтрации предложенным в данной работе фильтром с параметрами  $\lambda = 0,2$ ,  $k = 1,2$  и  $b = 0,7$  (рисунки 4е, 5з и 6з), а также другими широко известными помехоподавляющими фильтрами (рисунки 4а–д, 5в–ж, 6в–ж):

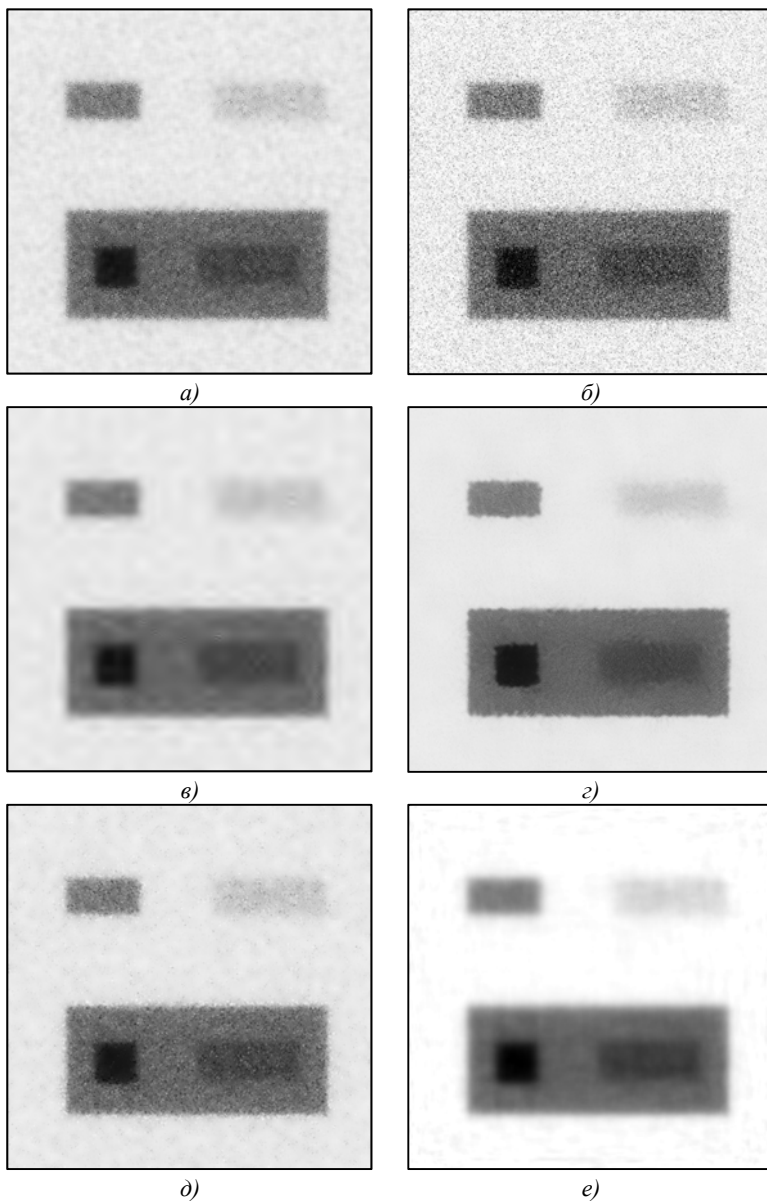


Рис. 4. Карта аномалий гравитационного поля, восстановленная из зашумленного изображения (рисунок 3а) посредством: а) WF; б) BF; в) NeighShringSURE; г) NLM JSCPW; д) ANLM; е) предложенного фильтра

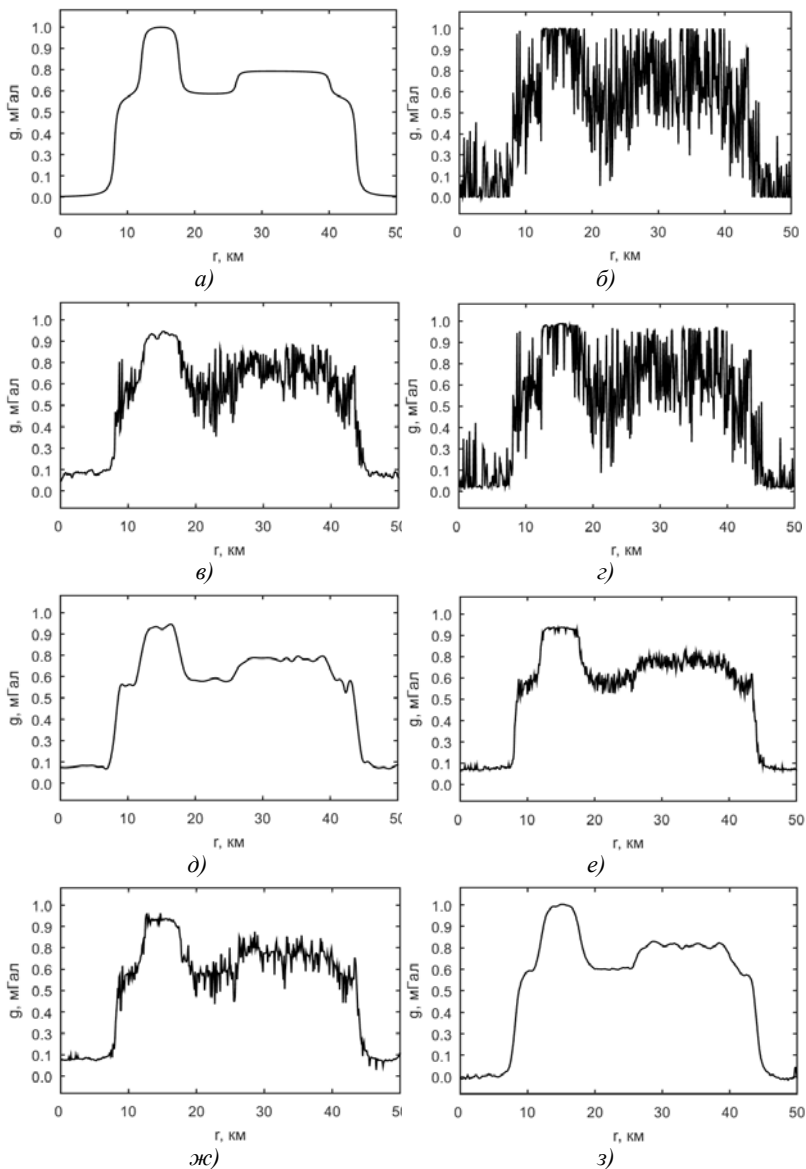


Рис. 5.  $r_l$ -профили полей гравитационных аномалий: а) исходного; б) зашумленного, отфильтрованного следующими фильтрами: в) WF; г) BF; д) NeighShringSURE; е) NLM JSCPW; ж) ANLM и з) предложенным фильтром

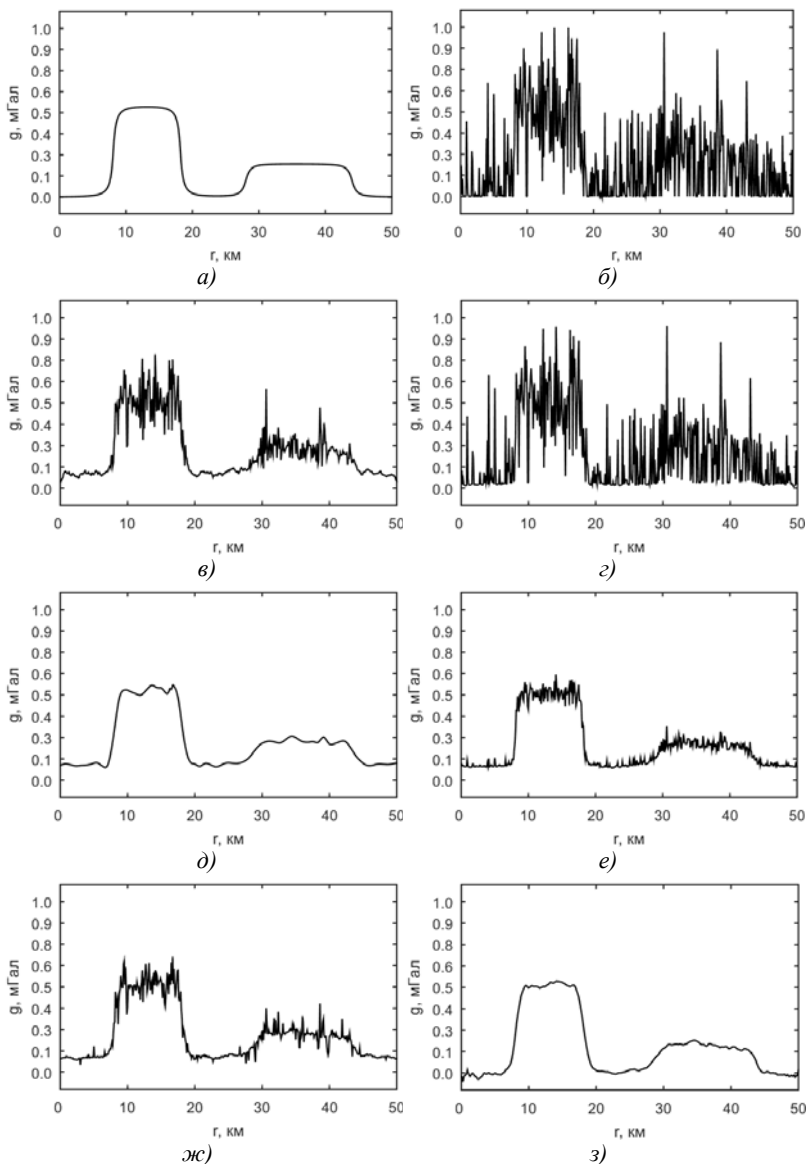


Рис. 6.  $r_2$ -профили полей гравитационных аномалий: *a)* исходного; *б)* зашумленного, полученные в результате фильтрации зашумленного поля: *в)* WF; *г)* BF; *д)* NeighShringSURE; *е)* NLM JSCPW; *ж)* ANLM и *з)* предложенным фильтром

– билатеральным фильтром (BF) (половина размера окна — 3 пикселей; стандартное отклонение в пространственной области — 3,0; стандартное отклонение в области интенсивностей — 0,1) [31];

– вейвлет-фильтром, предложенным Чжоу Денъвеном и Чэном Вэньганом (NeighShringSURE) (количество уровней декомпозиции вейвлетов — 4; тип вейвлетов — симлеты восьмого порядка) [32];

– фильтром нелокального усреднения, предложенного Юэ У и другими (NLM JSCPW) (половина размера окрестности каждого пикселя — 3 пикселя; половина размера области поиска — 17 пикселей; половина размера блока — 11 пикселей; параметр, контролирующий убывание весов — 0,1 [23];

– фильтром Винера (WF) (размеры окна — 9×9 пикселей);

– фильтром нелокального усреднения с адаптивным размером окна поиска, предложенного Радживом Верма и Раджу Пандеем (ANLM) [22].

Оценка качества подавления помех различными фильтрами проводилась на основе анализа следующих показателей (таблица 2):

– визуального качества отфильтрованного изображения;

– значений эталонных метрик оценки качества отфильтрованного изображения;

– времени, затрачиваемым фильтром на обработку зашумленного изображения (ВР).

В работе были использованы следующие эталонные метрики оценки качества:

– средний квадрат ошибки (СКО):

$$\text{СКО} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N^2} (f'_i - f_i)^2,$$

где  $f_i$  и  $f'_i$  — соответственно исходное и отфильтрованное изображение;

– пиковое отношение сигнала к шуму (ПОСШ):

$$\text{ПОСШ} = 10 \log_{10} \frac{1}{\text{СКО}};$$

– универсальный индекс качества (УИК) [33]:

$$\text{УИК} = \frac{4\sigma_{f'}\mu_f\mu_{f'}}{(\sigma_f^2 + \sigma_{f'}^2)(\mu_f^2 + \mu_{f'}^2)};$$

где  $\mu_f$  и  $\mu_{f'}$  — средние значения, а  $\sigma_f$  и  $\sigma_{f'}$  — стандартные отклонения, рассчитываемые по исходному и отфильтрованному изображениям;  $\sigma_{ff'}$  вычисляется по следующей формуле:

$$\sigma_{ff'} = \frac{1}{N^2 - 1} \sum_{i=1}^{N^2} (f_i - \mu_f)(f'_i - \mu_{f'});$$

– индекс структурного подобия (ИСП) [34]:

$$\text{ИСП} = \frac{(2\mu_f\mu_{f'} + C_1)(2\sigma_{ff'} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_{f'}^2 + C_1)(\sigma_f^2 + \sigma_{f'}^2 + C_2)},$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — константы, которые выбирались равными 0,01 и 0,03 соответственно. Следует также заметить, что УИК и ИСП рассчитывались в скользящем окне размером 8 и 11 пикселей соответственно.

Значения параметров каждого фильтра за исключением фильтра ANLM, не имеющего параметров, выбирались в результате специальной процедуры. Суть этой процедуры состояла в поиске для каждого фильтра такого набора значений его параметров, при котором одна из перечисленных выше метрик оценки качества отфильтрованного изображения принимает максимальное значение. В качестве такой метрики было выбрано ПОСШ, а в качестве алгоритма поиска — перебор на следующих множествах значений:

– {3;5;7}, {0,1;0,2;...;3,0} и {0,1;0,2;...;3,0} для соответственно параметров «половина размера окна», «стандартное отклонение в пространственной области» и «стандартное отклонение в области интенсивностей» BF;

– {симлеты третьего порядка; симлеты восьмого порядка; койфлеты третьего порядка; койфлеты пятого порядка, дискретные вейвлеты Мейера, вейвлеты Добеши третьего порядка, вейвлеты Добеши восьмого порядка} и {1;2;...;  $N_{\max}$ } ( $N_{\max}$  — максимально допустимое количество уровней декомпозиции) для соответственно параметров «тип вейвлетов» и «количество уровней декомпозиции вейвлетов» NeighShringSURE;

– {3;5}, {11;13;15;17}, {11;13;15;17} и {0,1;0,2;0,3;0,4;0,5} для соответственно параметров «половина размера окрестности каждого пикселя», «половина размера области поиска», «половина размера блока» и параметра, контролирующего убывание весов NLM JSCPW.

– {3;5;7;9} для параметра «размер окна» WF;

–  $\{0,1;0,2;\dots;1,0\}$ ,  $\{0,5;0,6;\dots;1,5\}$  и  $\{0,1;0,2;\dots;2,0\}$  для соответственно параметров  $\lambda$ ,  $b$  и  $k$  предложенного фильтра.

Для примера на рисунке 7 представлены зависимости ПОСШ( $k;b;0,2$ ) (а), ПОСШ( $k;0,7;\lambda$ ) (б) и ПОСШ( $1,2;b;\lambda$ ) (в), полученные при анализе параметров предложенного фильтра применительно к тестовой карте Т1 и содержащие точку глобального максимума (1,2;0,7;0,2).

Далее все перечисленные выше метрики, а также ВР вычислялись для десяти реализаций шума. Итоговые значения метрик и ВР были получены путем осреднения значений метрик и ВР, рассчитанных для каждого зашумленного изображения (таблица 2). Обработка проводилась в среде MATLAB R2015a на компьютере с процессором Intel Core i7–3770К 3,5 ГГц с объемом оперативной памяти 24 Гб.

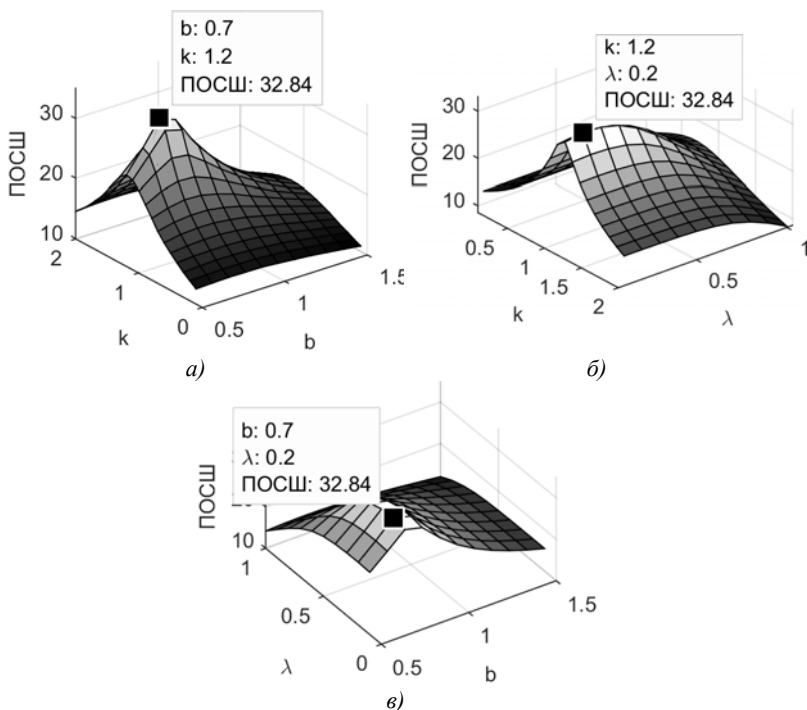


Рис. 7. Зависимости: а) ПОСШ( $k;b;0,2$ ); б) ПОСШ( $k;0,7;\lambda$ ); в) ПОСШ( $1,2;b;\lambda$ ), построенные для предложенного фильтра применительно к тестовой карте Т1



На основе визуального анализа полученных в результате обработки отфильтрованных изображений были сделаны следующие выводы. Менее зашумленными являются изображения, полученные в результате применения предложенного фильтра, а также фильтров NeighShringSURE и NLM JSCPW. В то же время использование фильтров NeighShringSURE и NLM JSCPW уменьшает динамический диапазон идентифицируемых аномалий, завышая/занижая значения гравитационных аномалий. Это становится отчетливо видно при сопоставлении профилей аномалий (рисунки 5а, д, е и 6а, д, е), положение которых показано пунктирными линиями на исходной карте гравитационных аномалий (рисунок 3а). Такое искажение карт гравитационных аномалий является существенным недостатком рассматриваемых фильтров, способным привести к ошибкам в интерпретации схожих по интенсивности аномалий. Более того, поле аномалий, полученное после подавления помех фильтром NeighShringSURE, содержит большое число дефектов, по форме схожих с малыми локальными аномалиями. Данные дефекты в отдельных случаях могут стать источником обнаружения так называемых ложных аномалий.

Таблица 2. Оценки качества подавления помех различными фильтрами

Фильтр	Тест	СКО ( $10^{-2}$ МГал <sup>2</sup> )	ПОСШ	УИК	ИСП	ВР (с)
WF	T1	0,82±0,03	20,85±0,16	0,06±0,01	0,19±0,01	0,01±0,00
	T2	1,85±0,09	17,32±0,22	0,16±0,01	0,25±0,03	0,01±0,00
	T3	2,60±0,07	15,85±0,11	0,37±0,01	0,37±0,02	0,01±0,00
BF	T1	0,67±0,52	22,32±2,00	0,12±0,03	0,34±0,11	5,21±0,10
	T2	2,10±2,09	17,66±2,36	0,17±0,04	0,27±0,08	1,16±0,05
	T3	2,67±0,08	15,74±0,14	0,36±0,02	0,34±0,05	0,41±0,03
Neigh-Shring-SURE	T1	0,51±0,00	22,95±0,03	0,22±0,00	0,46±0,00	6,41±0,02
	T2	1,48±0,00	18,30±0,06	0,24±0,01	0,60±0,02	1,80±0,03
	T3	3,23±0,57	14,95±0,64	0,38±0,05	0,51±0,11	0,40±0,06
NLM JSCPW	T1	0,50±0,00	23,03±0,10	0,23±0,04	0,43±0,04	0,01±0,00
	T2	1,78±0,09	17,50±0,24	0,22±0,01	0,57±0,00	0,01±0,00
	T3	5,29±0,85	12,84±0,90	2,67±0,08	0,21±0,05	0,01±0,00
ANLM	T1	0,62±0,00	22,09±0,03	0,09±0,00	0,26±0,00	341,26±1,07
	T2	1,72±0,01	17,66±0,05	0,16±0,00	0,29±0,00	41,94±0,44
	T3	3,15±0,08	15,02±0,11	0,33±0,01	0,35±0,01	5,96±0,10
Предложенный фильтр	T1	0,05±0,00	32,75±0,20	0,29±0,00	0,67±0,01	0,57±0,03
	T2	1,51±0,41	18,52±2,09	0,27±0,01	0,63±0,03	0,14±0,01
	T3	2,46±0,51	16,21±1,23	0,48±0,02	0,60±0,01	0,05±0,00

Анализ значений метрик оценки качества зашумленных изображений подтверждает выводы, сделанные в результате визуального анализа. Значения метрик ПОСШ, УИК и ИСП больше, а метрики СКО в большинстве случаев меньше для изображений, восстановленных предложенным фильтром, по сравнению со значениями тех же метрик, рассчитанных для изображений, восстановленных другими методами фильтрации. Это позволяет сделать вывод, что предложенный метод позволяет получить более качественные карты гравитационных аномалий в смысле их близости к исходному не зашумленному полю аномалий.

Последний показатель качества, который был проанализирован в данной работе, — это длительность работы фильтра подавления помех. Как видно из таблицы 2, наиболее быстрым из всех анализируемых фильтров оказался WF. Вместе с тем визуальный анализ и анализ метрик оценки качества указывает на то, что результат фильтрации WF значительно уступает по качеству остальным методам. Чуть медленнее работает фильтр NLM JSCPW. Предложенный в работе фильтр является третьим по скорости, существенно опережая по показателю BP фильтры BF, NeighShringSURE и ANLM. Таким образом, фильтр подавления высокочастотных помех, основанный на использовании моментов Чебышева, обладает высоким быстродействием, достаточным для решения поставленной в работе задачи. Следует обратить внимание также и на то, что в процессе апробации были использованы наиболее эффективные и хорошо отлаженные реализации WF и NLM JSCPW, тогда как реализация предложенного в работе фильтра имеет значительный потенциал для увеличения быстродействия.

**7. Заключение.** В работе предложен фильтр подавления высокочастотных помех, основанный на использовании моментов Чебышева. Апробация данного фильтра была проведена на трех тестовых моделях аномальных гравитационных полей, представленных в виде полутонковых изображений. Результаты применения разработанного фильтра сравнивались с результатами применения к зашумленным изображениям других широко распространенных фильтров подавления высокочастотных помех: фильтра Винера, билатерального фильтра, вейвлет-фильтра, предложенного Чжоу Дэнвеном и Чэном Вэньганом, фильтра нелокального усреднения, предложенного Юэ У и другими, а также фильтра нелокального усреднения с адаптивным размером окна поиска, предложенного Радживом Верма и Раджу Пандеем. Параметры всех фильтров находились по общей методике: путем перебора наиболее вероятных значений и сравнения восстанавливаемых изображений с исходными изображениями на

основе метрики ПОСШ. Результаты экспериментальной проверки показали, что предложенный фильтр в целом превосходит по качеству подавления помех все рассматриваемые аналоги.

### Литература

1. *Блох Ю.И.* Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий // М.: МГГА. 2009. 88 с.
2. *Biswas A.* Interpretation of residual gravity anomaly caused by simple shaped bodies using very fast simulated annealing global optimization // *Geosci. Front.* 2015. vol. 6. no. 6. pp. 875–893.
3. *Аронов В.И.* Методы построения карт геолого-геофизических признаков и геометризация залежей нефти и газа на ЭВМ // М.: Недра. 1990. 301 с.
4. *Pilkington M., Shamsipour P.* Noise reduction procedures for gravity gradiometer data // *GEOPHYSICS.* 2014. vol. 79. no. 5. pp. G69–G78.
5. *Uchaev D.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A.* Image contrast enhancement using Chebyshev wavelet moments // Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015). International Society for Optics and Photonics. 2015. vol. 9875. pp. 987512.
6. *Uchaev D.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A.* Chebyshev-based technique for automated restoration of digital copies of faded photographic prints // *J. Electron. Imaging.* 2017. vol. 26. no. 1. pp. 011024.
7. *Малинникова О.Н., Малинников В.А., Учаев Дм.В., Учаев Д.В.* О влиянии шумов полученных СЭМ изображений угольных образцов на оценку склонности углей к внезапным выбросам // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XXVI Международ. науч. школы. 2016. С. 134–139.
8. *While J., Jackson A., Smit D., Biegert E.* Spectral analysis of gravity gradiometry profiles // *GEOPHYSICS.* 2006. vol. 71. no. 1. pp. J11–J22.
9. *Pajot G. et al.* Noise reduction through joint processing of gravity and gravity gradient data // *GEOPHYSICS.* 2008. vol. 73. no. 3. pp. I23–I34.
10. *Yuan Y., Huang D.-N., Yu Q.-L., Geng M.-X.* Noise filtering of full-gravity gradient tensor data // *Appl. Geophys.* 2013. vol. 10. no. 3. pp. 241–250.
11. *Martinez C., Li Y.* Denoising of gravity gradient data using an equivalent source technique // *GEOPHYSICS.* 2016. vol. 81. no. 4. pp. G67–G79.
12. *Guo Z.-H., Luo F., Wang M., Wang J.-B.* The Design and Experiment of IIR Lowpass Digital Filters for Airborne Gravity Data // *Chin. J. Geophys.* 2011. vol. 54. no. 4. pp. 621–626.
13. *Childers V., Bell R., Brozena J.* Airborne gravimetry: An investigation of filtering // *GEOPHYSICS.* 1999. vol. 64. no. 1. pp. 61–69.
14. *Bakkali S.* The Use of Savitzky-Golay Filter to Denoising Moroccan Bouguer Gravity Anomaly Map // *Ann. Fac. Eng. Hunedoara — J. Eng.* 2008. vol. 6. pp. 183–190.
15. *Zou X., Cai S., Wu M.* The airborne gravity signal processing based on Kalman and FIR cascade filter // IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA'2016). 2016. pp. 1996–2000.
16. *Forsbergbi R. et al.* Airborne Gravimetry Survey for the Marine Area of the United Arab Emirates // *Mar. Geod.* 2012. vol. 35. no. 3. pp. 221–232.
17. *Pawlowski R.S., Hansen R.O.* Gravity anomaly separation by wiener filtering // *GEOPHYSICS.* 1990. vol. 55. no. 5. pp. 539–548.
18. *Zhang D., Huang D., Lu J., Zhu B.* Gravity Gradient Data Filtering Using Translation Invariant Wavelet // ASEG Extended Abstracts 2016: 25th International Geophysical Conference and Exhibition. Australian Society of Exploration Geophysicists, 2016. pp. 885–889.

19. *Wu Y., Li H.* Improved Pre-processing Algorithm for Satellite Gravimetry Data Using Wavelet Method // Principle and Application Progress in Location-Based Services. 2014. pp. 95–105.
20. *Yunlong W. et al.* Outlier detection algorithm for satellite gravity gradiometry data using wavelet shrinkage de-noising // Geod. Geodyn. 2012. vol. 3. no. 2. pp. 47–52.
21. *Singh K., Ranade S.K., Singh C.* Comparative performance analysis of various wavelet and nonlocal means based approaches for image denoising // Opt. — Int. J. Light Electron Opt. 2017. vol. 131. pp. 423–437.
22. *de Oliveira Lyrio J., Tenorio L., Li Y.* Efficient automatic denoising of gravity gradiometry data // GEOPHYSICS. 2004. vol. 69. no. 3. pp. 772–782.
23. *Verma R., Pandey R.* Non local means algorithm with adaptive isotropic search window size for image denoising // 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON). 2015. pp. 1–5.
24. *Wu Y., Tracey B., Natarajan P., Noonan J.P.* James–Stein Type Center Pixel Weights for Non-Local Means Image Denoising // IEEE Signal Process. Lett. 2013. vol. 20. no. 4. pp. 411–414.
25. *Mukundan R., Ong S.H., Lee P.A.* Image analysis by Tchebichef moments // IEEE Trans. Image Process. 2001. vol. 10. no. 9. pp. 1357–1364.
26. *Mukundan R.* Some computational aspects of discrete orthonormal moments // IEEE Trans. Image Process. 2004. vol. 13. no. 8. pp. 1055–1059.
27. *Honarvar B., Paramesran R., Lim C.–L.* Image reconstruction from a complete set of geometric and complex moments // Signal Process. 2014. vol. 98. pp. 224–232.
28. *Mukundan R., Ong S.H., Lee P.A.* Discrete vs. Continuous Orthogonal Moments for Image Analysis // Proc. of the International Conference on Imaging Science, Systems and Technology (CISST'01). 2001. pp. 23–29.
29. *Uchaev Dm.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A.* Orthogonal wavelet moments and their multifractal invariants // Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2014). International Society for Optics and Photonics. 2015. vol. 9445. pp. 94450U–94450U-8.
30. *Özgü Arısoy M., Dikmen Ü.* Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping // Comput. Geosci. 2011. vol. 37. no. 7. pp. 935–942.
31. *Tomasi C., Manduchi R.* Bilateral filtering for gray and color images // Sixth International Conference on Computer Vision. 1998. pp. 839–846.
32. *Dengwen Z., Wengang C.* Image denoising with an optimal threshold and neighbouring window // Pattern Recognit. Lett. 2008. vol. 29. no. 11. pp. 1694–1697.
33. *Wang Z., Bovik A.C.* A universal image quality index // IEEE Signal Process. Lett. 2002. vol. 9. no. 3. pp. 81–84.
34. *Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // Image Process. IEEE Trans. On. 2004. vol. 13. no. 4. pp. 600–612.

**Учаев Денис Валентинович** — к-т техн. наук, доцент кафедры космического мониторинга и экологии, Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК). Область научных интересов: классификация изображений и распознавание образов, теория фракталов и ее применение к анализу изображений, тематический анализ изображений, получаемых в процессе дистанционного зондирования, применение методов искусственного интеллекта к решению задач в области картографии. Число научных публикаций — 65. d-uchaev@yandex.ru; Гороховский пер., 4, Москва, 105064; р.т.: +7(499)267-2772.

**Журкин Игорь Георгиевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и автоматизированной обработки аэрокосмической информации, Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК). Область научных интересов: цифровая обработка изображений, геоинформатика, автоматизация фотограмметрических процессов. Число научных публикаций — 200. zhurkin@miigaik.ru; Гороховский пер., 4, Москва, 105064; р.т.: +7(499)267-1377.

**Учаев Дмитрий Валентинович** — к-т техн. наук, доцент кафедры космического мониторинга и экологии, Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК). Область научных интересов: фрактальный анализ, вейвлет-анализ, реконструкция изображений, повышение качества изображений, прямые и обратные задачи в дистанционном зондировании, тематический анализ данных дистанционного зондирования. Число научных публикаций — 60. d-uchaev@ya.ru; Гороховский пер., 4, Москва, 105064; р.т.: +7(499)267-2772.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00720-а).

D.V. UCHAEV, I.G. ZHURKIN, Dm.V. UCHAEV  
**USING CHEBYSHEV MOMENTS TO SOLVE PROBLEMS  
 OF SUPPRESSION OF HIGH-FREQUENCY NOISES IN FIELDS OF  
 GRAVITATIONAL ANOMALIES**

---

*Uchaev D.V., Zhurkin I.G., Uchaev Dm.V. Using Chebyshev Moments to Solve Problems of Suppression of High-Frequency Noises in Fields of Gravitational Anomalies.*

**Abstract.** The work is devoted to the problem of improving the quality of anomalous gravitational fields by reducing the level of their high-frequency noise. A brief review of existing approaches and methods for suppressing high-frequency noise in the fields of gravitational anomalies is given. A method for filtering fields of gravitational anomalies based on the transformation performed in the Chebyshev moment domain is proposed. The paper presents empirically established values of coefficients, which can be useful for an unknown level of noise. Using the simulated map of gravity anomalies, it was demonstrated that the proposed denoising filter is comparable in speed and superior in quality of the result to the bilateral filter, wavelet-filter, non-local means filters as well as the Wiener filter, which is well proven in the preliminary processing of gravitational fields.

**Keywords:** Gaussian noise, Chebyshev moments, gravity anomaly, denoising.

---

**Uchaev Denis Valentinovich** — Ph.D., associate professor of space monitoring and ecology department, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK). Research interests: image classification and pattern recognition, fractal theory and its application in image analysis, thematic analysis of remote sensing images, application of methods of artificial intelligence in cartography. The number of publications — 65. d-uchaev@yandex.ru; 4, Gorokhovskiy per., Moscow, 105064, Russia; office phone: +7(499)267-2772.

**Zhurkin Igor Georgievich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of computing machinery and automated aerospace information processing department, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK). Research interests: digital image processing, geoinformatics, automatization of photogrammetric processes. The number of publications — 200. zhurkin@mii-gaik.ru; 4, Gorokhovskiy per., Moscow, 105064, Russia; office phone: +7(499)267-1377.

**Uchaev Dmitry Valentinovich** — Ph.D., associate professor of space monitoring and ecology department, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK). Research interests: fractal and wavelet analysis, image reconstruction, image quality enhancement, forward and inverse problems in remote sensing, and thematic analysis of remote sensing data. The number of publications — 60. d-uchaev@ya.ru; 4, Gorokhovskiy per., Moscow, 105064, Russia; office phone: +7(499)267-2772.

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grant 16-05-00720-a).

### References

1. Blokh Yu.I. *Interpretatsiya gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii* [Interpretation of gravitational and magnetic anomalies]. Moscow: MGGA. 2009. 88 p. (In Russ.).
2. Biswas A. Interpretation of residual gravity anomaly caused by simple shaped bodies using very fast simulated annealing global optimization. *Geosci. Front.* 2015. vol. 6. no. 6. pp. 875–893.

3. Aronov V.I. *Metody postroeniya kart geologo-geofizicheskikh priznakov i geometrizacija zalezhej nefi i gaza na JeVM* [Methods for constructing maps of geological and geophysical features and the geometrization of oil and gas deposits on a computer]. Moscow: Nedra. 1990. 301 p. (In Russ.).
4. Pilkington M., Shamsipour P. Noise reduction procedures for gravity gradiometer data. *GEOPHYSICS*. 2014. vol. 79. no. 5. pp. G69–G78.
5. Uchaev D.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A. Image contrast enhancement using Chebyshev wavelet moments. Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015). International Society for Optics and Photonics. 2015. vol. 9875. pp. 987512.
6. Uchaev D.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A. Chebyshev-based technique for automated restoration of digital copies of faded photographic prints. *J. Electron. Imaging*. 2017. vol. 26. no. 1. pp. 011024.
7. Malinnikova O.N., Malinnikov V.A., Uchaev Dm.V., Uchaev D.V. [On the influence of the noise of the obtained SEM images of coal samples on the assessment of the propensity of coal to outburst] *Deformirovanie i razrushenie materialov s defektami i dinamicheskie javleniya v gornyh porodah i vyrabotkah: Materialy XXVI Mezhdunarod. nauch. shkoly* [Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and excavations: Materials of the XXVI International. Sci. Schools]. 2016. pp. 134–139. (In Russ.).
8. While J., Jackson A., Smit D., Biegert E. Spectral analysis of gravity gradiometry profiles. *GEOPHYSICS*. 2006. vol. 71. no. 1. pp. J11–J22.
9. Pajot G. et al. Noise reduction through joint processing of gravity and gravity gradient data. *GEOPHYSICS*. 2008. vol. 73. no. 3. pp. 123–134.
10. Yuan Y., Huang D.–N., Yu Q.–L., Geng M.–X. Noise filtering of full-gravity gradient tensor data. *Appl. Geophys*. 2013. vol. 10. no. 3. pp. 241–250.
11. Martinez C., Li Y. Denoising of gravity gradient data using an equivalent source technique. *GEOPHYSICS*. 2016. vol. 81. no. 4. pp. G67–G79.
12. Guo Z.–H., Luo F., Wang M., Wang J.–B. The Design and Experiment of IIR Lowpass Digital Filters for Airborne Gravity Data. *Chin. J. Geophys*. 2011. vol. 54. no. 4. pp. 621–626.
13. Childers V., Bell R., Brozena J. Airborne gravimetry: An investigation of filtering. *GEOPHYSICS*. 1999. vol. 64. no. 1. pp. 61–69.
14. Bakkali S. The Use of Savitzky-Golay Filter to Denoising Moroccan Bouguer Gravity Anomaly Map. *Ann. Fac. Eng. Hunedoara — J. Eng.* 2008. vol. 6. pp. 183–190.
15. Zou X., Cai S., Wu M. The airborne gravity signal processing based on Kalman and FIR cascade filter. IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA'2016). 2016. pp. 1996–2000.
16. Forsberg R. et al. Airborne Gravimetry Survey for the Marine Area of the United Arab Emirates. *Mar. Geod.* 2012. vol. 35. no. 3. pp. 221–232.
17. Pawlowski R.S., Hansen R.O. Gravity anomaly separation by wiener filtering. *GEOPHYSICS*. 1990. vol. 55. no. 5. pp. 539–548.
18. Zhang D., Huang D., Lu J., Zhu B. Gravity Gradient Data Filtering Using Translation Invariant Wavelet. ASEG Extended Abstracts 2016: 25th International Geophysical Conference and Exhibition. Australian Society of Exploration Geophysicists, 2016. pp. 885–889.
19. Wu Y., Li H. Improved Pre-processing Algorithm for Satellite Gravimetry Data Using Wavelet Method. Principle and Application Progress in Location-Based Services, 2014. pp. 95–105.
20. Yunlong W. et al. Outlier detection algorithm for satellite gravity gradiometry data using wavelet shrinkage de-noising. *Geod. Geodyn.* 2012. vol. 3. no. 2. pp. 47–52.

21. Singh K., Ranade S.K., Singh C. Comparative performance analysis of various wavelet and nonlocal means based approaches for image denoising. *Opt. — Int. J. Light Electron Opt.* 2017. vol. 131. pp. 423–437.
22. de Oliveira Lyrio J., Tenorio L., Li Y. Efficient automatic denoising of gravity gradiometry data. *GEOPHYSICS*. 2004. vol. 69. no. 3. pp. 772–782.
23. Verma R., Pandey R. Non local means algorithm with adaptive isotropic search window size for image denoising. 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON). 2015. pp. 1–5.
24. Wu Y., Tracey B., Natarajan P., Noonan J.P. James–Stein Type Center Pixel Weights for Non-Local Means Image Denoising. *IEEE Signal Process. Lett.* 2013. vol. 20. no. 4. pp. 411–414.
25. Mukundan R., Ong S.H., Lee P.A. Image analysis by Tchebichef moments. *IEEE Trans. Image Process.* 2001. vol. 10. no. 9. pp. 1357–1364.
26. Mukundan R. Some computational aspects of discrete orthonormal moments. *IEEE Trans. Image Process.* 2004. vol. 13. no. 8. pp. 1055–1059.
27. Honarvar B., Paramesran R., Lim C.–L. Image reconstruction from a complete set of geometric and complex moments. *Signal Process.* 2014. vol. 98. pp. 224–232.
28. Mukundan R., Ong S.H., Lee P.A. Discrete vs. Continuous Orthogonal Moments for Image Analysis. Proc. of the International Conference on Imaging Science, Systems and Technology (CISST'01). 2001. pp. 23–29.
29. Uchaev Dm.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A. Orthogonal wavelet moments and their multifractal invariants. Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2014). International Society for Optics and Photonics. 2015. vol. 9445. pp. 94450U–94450U-8.
30. Özgü Arısoy M., Dikmen Ü. Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping. *Comput. Geosci.* 2011. vol. 37. no. 7. pp. 935–942.
31. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. Sixth International Conference on Computer Vision. 1998. pp. 839–846.
32. Dengwen Z., Wengang C. Image denoising with an optimal threshold and neighbouring window. *Pattern Recognit. Lett.* 2008. vol. 29. no. 11. pp. 1694–1697.
33. Wang Z., Bovik A.C. A universal image quality index. *IEEE Signal Process. Lett.* 2002. vol. 9. no. 3. pp. 81–84.
34. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *Image Process. IEEE Trans. On.* 2004. vol. 13. no. 4. pp. 600–612.



В.И. Котенко, И.Б. Саенко, М.А. Коцыняк, О.С. Лаута  
**ОЦЕНКА КИБЕРУСТОЙЧИВОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИБЕРАТАК МЕТОДОМ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

*Котенко В.И., Саенко И.Б., Коцыняк М.А., Лаута О.С. Оценка киберустойчивости компьютерных сетей на основе моделирования кибератак методом преобразования стохастических сетей.*

**Аннотация:** В статье предложен подход к оценке киберустойчивости компьютерных сетей, основанный на аналитическом моделировании компьютерных атак с применением метода преобразования стохастических сетей. Обосновывается понятие киберустойчивости компьютерных сетей. Рассматриваются математические основы такой оценки, позволяющие с помощью аналитических выражений вычислить показатели киберустойчивости. В качестве основного показателя предлагается использовать коэффициент исправного действия по киберустойчивости. Рассматриваемый подход предполагает построение аналитических моделей реализации компьютерных атак. Для построения аналитических моделей кибератак применяется метод преобразования стохастических сетей. Результатом моделирования является функция распределения времени и среднее время реализации кибератаки. Эти оценки используются затем для нахождения показателей киберустойчивости. Приведены экспериментальные результаты аналитического моделирования, которые показали, что предложенный подход обладает достаточно высокой точностью и устойчивостью получаемых решений.

**Ключевые слова:** кибербезопасность, кибератаки, моделирование атак, киберустойчивость, стохастические сети, преобразование Лапласа.

**1. Введение.** Компьютерные сети и системы в процессе своего функционирования выполняют различные функции, которые поддерживаются соответствующими сервисами. При этом все сервисы можно условно разделить на две группы: локальные и распределенные. Локальные сервисы функционируют на узлах сети. К их числу можно отнести базу данных коллективного пользования, сетевой принтер, прокси-сервер, сервер приложений и так далее. За поддержание работы локального сетевого сервиса, как правило, отвечает один узел в компьютерной сети. Коммуникационные сервисы (обмен файлами, внутренняя электронная почта, IP-телефония и другие) отвечают за передачу информации в различной форме от одного узла сети к другому узлу.

Воздействия на компьютерную сеть по своей природе могут быть разными. Традиционно выделяются три группы таких факторов: (1) внешние физические дестабилизирующие факторы; (2) внутренние дестабилизирующие факторы, обусловленные длительным временем работы элементов сети; (3) электромагнитные помехи. Однако в последнее время возникла необходимость дополнить множество сетевых дестабилизирующих факторов еще одной группой, содержанием которой являются программно-информационные воздействия, или кибератаки.

Если про традиционные группы факторов можно сказать, что они в достаточной степени исследованы и рассматриваются во многих сложных электротехнических системах, не только в компьютерных сетях, то последняя группа факторов характерна именно для компьютерных сетей, так как именно компьютерная обработка информации является средой для распространения кибератак [1]. Возможными результатами воздействия кибератак на компьютерные сети и системы являются несанкционированный доступ, блокирование управляющей информации, внедрение ложной информации, нарушение установленных регламентов сбора, обработки и передачи информации в автоматизированных системах контроля и управления, отказы и сбои в работе компьютерной сети, а также компрометация передаваемой или получаемой информации. Это позволяет считать, что кибератаки и способность противодействовать их реализации являются ключевыми факторами, определяющими устойчивость компьютерных сетей. По этой причине в статье акцентируется внимание именно на кибератаках как наименее изученной, но достаточно важной группе дестабилизирующих факторов. При этом понятие киберустойчивости трактуется как устойчивость компьютерной сети в условиях воздействия кибератак.

При рассмотрении функционала, который должна обеспечить компьютерная сеть в условиях воздействия кибератак, мы будем ограничиваться только коммуникационными сервисами, не умаляя при этом важность локальных сервисов. Учет локальных сервисов рассматривается как направление дальнейших исследований.

Киберустойчивость рассматривается как способность компьютерной сети обеспечивать и поддерживать приемлемый уровень обслуживания в условиях неисправностей и проблем в нормальном режиме работы [2, 3]. Для оценки киберустойчивости необходимо определить вероятные проблемы, риски и соответствующие показатели устойчивости [4]. При этом учитываются такие этапы, как планирование, подготовка, обнаружение, принятие мер защиты и восстановление [5]. Подход, рассматриваемый в настоящей статье, следует этим принципам, однако имеет некоторые особенности. В качестве показателя, позволяющего оценить критическую функциональность компьютерной сети при условии приоритетности коммуникационных сервисов, предлагается использовать коэффициент исправного действия, который вычисляется через аналогичные по назначению показатели, применяемые к направлениям связи и к маршрутам передачи данных, существующим между критическими узлами сети. При этом про аналитические модели атак, формируемые с помощью предлагаемого в настоящей статье метода, можно говорить, что они охватывают этапы планирования, подготовки,

обнаружения, принятия мер защиты и восстановления. Эти этапы учитывают функционирование сети на начальном этапе кибератаки (сканирования сети), на этапах ее реализации и обнаружения и на этапе принятия мер по противодействию атаке и восстановлению работоспособности сети. Этап планирования учитывается косвенным образом путем анализа полученных оценок с целью выбора наиболее приемлемого варианта построения сети.

Подход, рассматриваемый в статье, предполагает построение аналитических моделей для реализации атак. Результатом моделирования является функция распределения времени и среднее время реализации кибератаки. Эти оценки используются затем для нахождения показателей киберустойчивости. Для построения аналитической модели кибератаки применяется подход, основанный на преобразовании стохастических сетей [6]. Он отличается более высокой точностью и устойчивостью получаемых решений и хорошо зарекомендовал себя для моделирования многошаговых стохастических процессов различной природы.

Рассмотренный подход получил в статье экспериментальную проверку для двух наиболее известных и популярных видов атак. Атака «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей» является характерным примером атаки пассивного типа, которая не наносит разрушений в сети, но выявляет важную информацию, которую впоследствии злоумышленник может использовать для проведения более серьезных атак. Атака «Отказ в обслуживании (DoS)» является характерным примером активных атак, которые существенно нарушают работоспособность компьютерной сети. Эти два типа атак будут рассмотрены в качестве объектов для аналитического моделирования.

Теоретический вклад статьи заключается в дальнейшем развитии методов аналитического моделирования кибератак [7, 8] и в их применении для оценки киберустойчивости как очень важного свойства компьютерной сети или системы. Новизна полученных результатов определяется использованием метода преобразования стохастических сетей для аналитического моделирования кибератак.

**2. Математические основы оценки киберустойчивости компьютерной сети.** Если в качестве вида воздействия на сеть учитывать только кибератаки, то можно ограничиться рассмотрением коммуникационных сервисов, так как этот тип сервисов, как мы полагаем, при кибератаках будет испытывать наибольшее влияние. В этом случае компьютерную сеть будем рассматривать как разновидность информационно-телекоммуникационной сети (ИТКС), в которой основным функционалом является обмен информацией в различных направлениях.

Положим, сеть имеет вид, представленный на рисунке 1. ИТКС состоит из узловых элементов (УЭ) 1-4, включающих в себя маршрутизаторы 1-4 и персональные ЭВМ (ПЭВМ) 1-8, а также сетевых элементов, включающих маршрутизаторы 5-11.

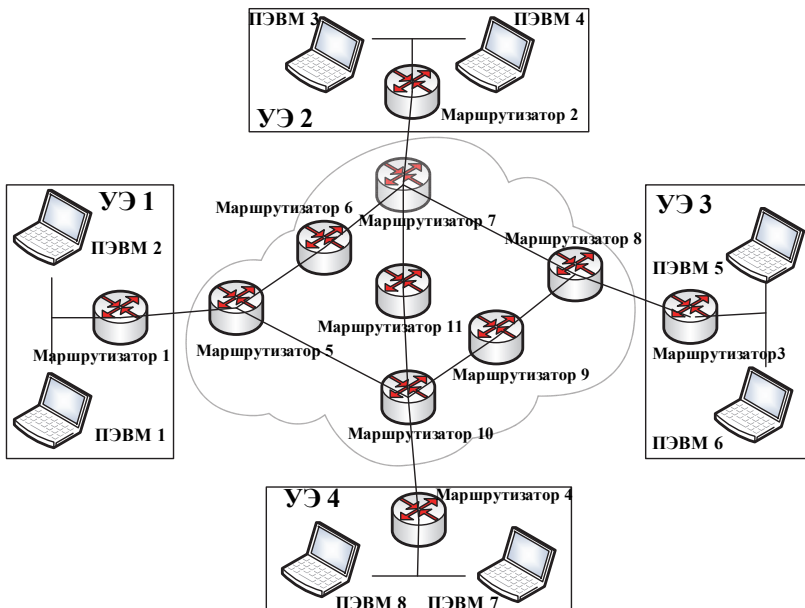


Рис. 1. Структура компьютерной сети (вариант)

Путь передачи информации от узловых элементов УЭ 1–4 через маршрутизаторы 5–11 называется *маршрутом* передачи данных. Маршруты могут быть простыми (один интервал связи) или составными (несколько интервалов связи). Совокупность маршрутов передачи информации между двумя узловыми элементами (УЭ 1 и УЭ 3; УЭ 2 и УЭ 4; УЭ 1 и УЭ 2 и др.) образуют *направление связи*, а совокупность направлений связи и ПЭВМ 1-8 — ИТКС.

В качестве показателя, характеризующего устойчивость компьютерной сети при воздействии кибератак, или *киберустойчивость*, предлагается использовать коэффициент исправного действия ( $K_{sa}$ ), который вычисляется следующим образом:

$$K_{sa} = \text{Время исправной работы сети} / \text{Общее время работы сети}. \quad (1)$$

Этот показатель показывает, какую часть времени от всего учитываемого времени работы компьютерной сети она функционирует исправно.

С целью определения  $K_{sa}$  сначала находятся коэффициенты исправного действия для каждого маршрута в условиях воздействия атак и вероятность воздействия на эти маршруты. Для этого необходимо рассмотреть процесс функционирования компьютерной сети в условиях воздействия системы атак, представленный на рисунке 2.

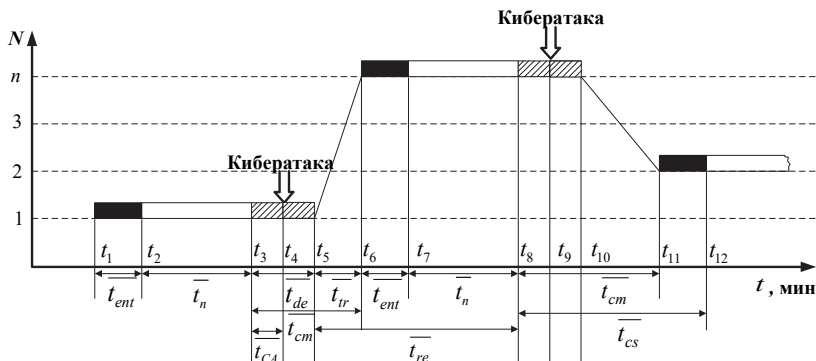


Рис. 2. Процесс функционирования компьютерной сети в условиях воздействия кибератак

В обобщенном виде процесс функционирования компьютерной сети в условиях воздействия атак можно представить следующим образом [9]. Для осуществления передачи информации длительностью  $t_n$  (в моменты времени  $t_2, t_7, t_{12}$  и т.д.) удаленные пользователи (сервисы) компьютерной сети сначала входят в связь ( $t_1$ ), на что затрачивается в среднем время  $\overline{t_{ent}}$ . Затем (в моменты времени  $t_3, t_8$  и т.д.) система информационного воздействия реализует кибератаку за среднее время  $t_{CA}$ , которую оператор сети (компонент защиты) сможет обнаружить (в моменты времени  $t_5, t_{10}$  и т.д.) за среднее время  $\overline{t_{de}}$ , определяемое временем реакции системы мониторинга сети.

Обнаружив воздействие атаки, оператор сети будет принимать меры по восстановлению коммуникационных сервисов (в моменты времени  $t_5, t_{10}$  и т.д.) за среднее время  $\overline{t_{ir}}$ .

После этого операторы (компоненты) сети входят в связь или иницируют взаимодействие (в моменты времени  $t_6, t_{11}$  и т.д.), на что затрачивается некоторое среднее время  $\overline{t_{ent}}$ , и передача информации возобновляется.

Среднее время  $\overline{t_{CS}}$ , затрачиваемое на принятие мер защиты ( $\overline{t_{cm}}$ ) и вхождение в связь ( $\overline{t_{ent}}$ ), характеризует реакцию системы управления на воздействие кибератак, то есть определяется следующей суммой времени:  $\overline{t_{CS}} = \overline{t_{cm}} + \overline{t_{ent}} = \overline{t_{tr}} + \overline{t_{de}} + \overline{t_{ent}}$ .

Среднее время от момента принятия мер по восстановлению коммуникационных сервисов до момента воздействия кибератак назовем временем реакции  $\overline{t_{re}}$ . В течение этого времени злоумышленник производит сбор данных о сети (например, о топологии сети, активных элементах, открытых портах, типе операционной системы и т.д.).

Для определения коэффициента исправного действия и вероятности воздействия в условиях кибератак необходимо первоначально вычислить среднее значение времени простоя и времени исправной работы за достаточно большой промежуток времени функционирования сети. Учитывая, из чего складываются эти времена (см. рисунок 2), коэффициент исправного действия  $j$ -го интервала связи маршрута можно записать в следующем виде:

$$K_{sa,j} = \frac{\overline{t_{n,j}}}{\overline{t_{n,j}} + \overline{t_{CS,j}}} . \quad (2)$$

Так как маршрут передачи информации состоит из нескольких интервалов связи (взаимодействия), то коэффициент исправного действия  $j$ -го составного маршрута равен произведению коэффициентов исправного действия его интервалов:

$$K_{sa\_CM,j} = \prod_{l=1}^{O_j} K_{sa,jl} . \quad (3)$$

где  $K_{ca\_CM,j}$  — коэффициент исправного действия  $j$ -го составного маршрута;  $O_j$  — общее количество интервалов связи на  $j$ -ом маршруте;  $K_{sa,jl}$  — коэффициент исправного действия  $l$ -го интервала на  $j$ -м маршруте.

Воздействие кибератаки на отдельные маршруты направлений связи повлечет нарушение их функционирования и принятие мер по восстановлению нарушенных связей. С этой целью осуществляется поиск обходных маршрутов. Для оценки возможности установления соединений и передачи сообщений в случае выхода из строя элементов или целых участков введем в рассмотрение новую характеристику —

связность  $K_{rel}$  направлений и компьютерной сети. Под связностью будем понимать свойство компьютерной сети сохранять рабочее состояние при выходе из строя ее элементов или отдельных частей.

Ограниченные возможности применения известных показателей связности при решении задач анализа и синтеза сетей вынуждают расширить поиск таковых. Рассмотрим некоторый линейный функционал, представляющий собой линейную комбинацию определенным образом выбранных параметров связности, составленную по всем маршрутам сети. Такими параметрами могут быть относительная и абсолютная связности каждого маршрута компьютерной сети.

Для оценки каждой из этих видов связности предложим коэффициенты, лежащие в диапазоне от 0 до 1. Относительную связность  $j$ -го маршрута компьютерной сети  $K_{rel\_ref,j}$  определим следующим образом:

$$K_{rel\_ref,j} = \frac{H_j}{N - O_j} \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (4)$$

где  $H_j$  — ранг  $j$ -го маршрута;  $O_j$  — количество обходных маршрутов для  $j$ -го маршрута;  $N$  — общее число маршрутов в направлении связи ( $O_j < N$ ). Ранг  $j$ -го маршрута лежит в диапазоне от 1 до  $(N - O_j)$ , определяется экспертным путем и отражает значимость маршрута в обеспечении высокой устойчивости направления связи.

Абсолютную связность  $j$ -го маршрута можно определить отношением количества обходных маршрутов, которыми может обладать  $j$ -й маршрут, к общему числу маршрутов рассматриваемого направления связи:

$$K_{rel\_abs,j} = \frac{O_j}{N} \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (5)$$

Данная величина при фиксированном числе маршрутов  $N$  в сети будет полностью определяться величиной  $O_j$ . Чем больше  $O_j$ , тем больше абсолютная связность  $j$ -го маршрута.

На основании рассмотренных параметров предложим следующее выражение для нахождения связности  $i$ -го направления связи:

$$K_{rel\_D,i} = 0.5 \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij} \cdot (K_{rel\_ref,j} + K_{rel\_abs,j}), \quad (6)$$

где  $\alpha_{ij}$  — вес  $j$ -го маршрута в  $i$ -м направлении связи. Коэффициент 0.5 в выражении (6) установлен с целью, чтобы значение  $K_{rel\_D,i}$  находилось в диапазоне от 0 до 1.

Коэффициент исправного действия  $i$ -го направления связи  $K_{sa\_D,i}$  определяется по следующей формуле:

$$K_{sa\_D,i} = K_{rel\_D,i} \cdot \left( 1 - \prod_{j=1}^N (1 - K_{sa\_CM,j}) \right). \quad (7)$$

Учитывая, что компьютерная сеть состоит из  $M$  направлений связи, коэффициент исправного действия компьютерной сети в условиях кибератак определяется на основании следующих выражений:

$$K_{sa} = K_{rel} \cdot \left( 1 - \prod_{i=1}^M (1 - K_{sa\_D,i}) \right), \quad (8)$$

$$K_{rel} = \sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot \left( \frac{G_i}{M-L} + \frac{L}{M} \right), \quad (9)$$

где  $K_{sa}$  — коэффициент исправного действия компьютерной сети;  $K_{rel}$  — коэффициент связности сети;  $G_j$  — ранг  $i$ -го направления связи;  $M$  — количество направлений связи в компьютерной сети;  $L$  — количество обходных направлений связи ( $L < M$ ).

Таким образом, для определения коэффициента исправного действия компьютерной сети первоначально требуется определить среднее время воздействия кибератак и выработки мер противодействия, то есть определить вероятностно-временные характеристики атак. Для этого предлагается использовать эталонные модели кибератак и метод, который мы назовем методом преобразования стохастических сетей. Эталонная модель атаки — это последовательность (алгоритм) действий злоумышленника при реализации кибератаки.

**3. Метод преобразования стохастической сети.** Под стохастической сетью будем понимать совокупность взаимосвязанных узлов (вершин) и ветвей, соединение которых соответствует алгоритму функционирования исследуемой системы.

Суть метода преобразования стохастической сети заключается в том, что исследуется не система, а процесс, который она реализует. При этом сеть реализуется, если будет построено некоторое подмножество ветвей, время реализации которых выбирается в соответствии с вероятностным распределением [10, 11].



Стохастическая сеть не является моделью системы. Она является моделью процесса, который реализует эта система. Сложный процесс декомпозируется на элементарные процессы, каждый из которых характеризуется функцией распределения, средним временем и его дисперсией.

Логика и последовательность выполнения процессов определяется двухполюсной сетью, состоящей из входного, промежуточных и выходного узлов (вершин), при этом ребрам соответствует набор элементарных процессов, а вершинам (узлам) — условия их выполнения. Каждый узел (вершина) выполняет две функции — входную, определяющую условие (логическую операцию), при котором функция может быть выполнена, и выходную, определяющую какие из операций, следующих за узлом, будут выполняться. Входной узел сети выполняет только предшествующую выходную функцию, а выходной только входную.

Для каждого ребра определяется функция передачи. Эта функция играет роль условной характеристической функции. Она представляет собой преобразование Лапласа [12] для функции плотности вероятностей времени свершения элементарного процесса.

Далее осуществляется топологическое преобразование сети случайных процессов.

Напомним, что топология — раздел математики, изучающий свойства геометрических фигур, не изменяющиеся при любых деформациях, производимых без разрывов и склеиваний. Главной задачей топологии является изучение таких топологических свойств как связность, компактность, размерность и другие. В данном случае таким топологическим инвариантом является свойство связности графа.

Поскольку входная и выходная вершины двухполюсной сети (графа) являются связными, то с помощью стандартных процедур ее можно свести к одному ребру, связывающему эти вершины. Для этого в сети сначала выделяются последовательные, параллельные и петлеобразные пути, на которых определяются эквивалентные функции передачи, каждый из которых сводится к одному ребру. Затем с помощью правила Мейсона [13, 14] эти фрагменты объединяются в одно ребро с общей эквивалентной функцией передачи. При этом структура сети не исчезает бесследно — ее «следы» остаются в структуре эквивалентной функции. После получения эквивалентной функции производят обратное преобразование Лапласа, результатом которого является функция плотности вероятностей времени выполнения целевого процесса, либо определяют первые моменты случайного времени его выполнения [12].

В качестве примера построения эталонных моделей атак выберем следующие типы атак: «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей» и «Отказ в обслуживании».

**3. Модель атаки «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей».** Реализация этой атаки имеет следующие этапы:

- запуск программно-аппаратного комплекса ( сетевого сканера) за среднее время  $\overline{t_{start}}$  с функцией распределения времени  $W(t)$ ;
- определение активных элементов атакуемой сети с вероятностью  $P_n$  за среднее время  $\overline{t_{elem}}$  с функцией распределения времени  $Q(t)$ ;
- определение типов операционных систем на активных элементах сети с вероятностью  $P_n$  за среднее время  $\overline{t_{OS}}$  с функцией распределения времени  $D(t)$ ;
- определение сервисов на элементах сети с вероятностью  $P_n$  за среднее время  $\overline{t_{ser}}$  с функцией распределения времени  $L(t)$ ;
- определение уязвимостей за среднее время  $\overline{t_{vul}}$  с функцией распределения времени  $O(t)$ .

При этом, если активные элементы сети, типы операционных систем и сервисы на них не будут определены, то с вероятностью  $(1 - P_n)$  сетевой сканер будет запущен повторно за среднее время  $\overline{t_{rep}}$  с функцией распределения времени  $Z(t)$ .

Стохастическая сеть, отражающая выше перечисленные этапы атаки «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей», представлена на рисунке 3.

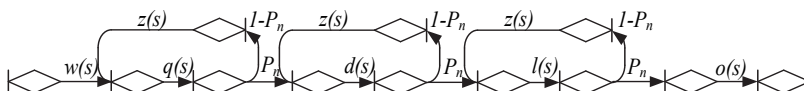


Рис. 3. Стохастическая сеть кибератаки «Сканирование сети и ее уязвимостей»

Функции  $w(s)$ ,  $l(s)$ ,  $q(s)$ ,  $d(s)$ ,  $o(s)$  and  $z(s)$ , находящиеся на выходе узлов стохастической сети, являются эквивалентными функциями и получаются путем применения преобразования Лапласа к функциям  $W(t)$ ,  $L(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $D(t)$ ,  $O(t)$ , и  $Z(t)$  соответственно.

Результатом преобразования стохастической сети является эквивалентная функция, сохраняющая в своей структуре параметры распределения и логику взаимодействия элементарных случайных процессов. Эквивалентная функция позволяет определить первые моменты случайного времени выполнения целевого процесса. Эквивалентная функция вычисляется по формуле Мейсона.

Стохастическая сеть содержит множество петель. Для определения эквивалентной функции вводится понятие замкнутой стохастической сети, а также петель первого и  $k$ -го порядков.

Замкнутой стохастической сетью называется сеть, в которой каждая ветвь принадлежит по крайней мере одной петле. Пример замкнутой стохастической сети, соответствующей атаке «Сканирование сети и ее уязвимостей», представлен на рисунке 4.

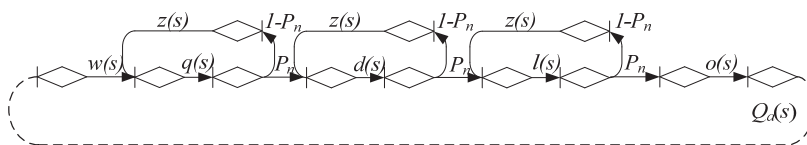


Рис. 4. Замкнутая стохастическая сеть кибератаки «Сканирование сети и ее уязвимостей»

Петли первого порядка — это петли, не содержащие других петель и позволяющие достичь каждой вершины петли из любой другой.

Петля  $k$ -го порядка — множество  $k$  не связанных между собой петель первого порядка.

Теперь определим все петли в стохастической сети, приведенной на рисунке 4. Вначале определим петли первого порядка. Общее количество этих петель равно 4.

Первая петля первого порядка состоит из последовательно соединенных ветвей  $w(s)$ ,  $q(s)$ ,  $P_n$ ,  $d(s)$ ,  $P_n$ ,  $l(s)$ ,  $P_n$ , and  $o(s)$ . Эквивалентная функция для этой петли имеет следующий вид:

$$w(s) \cdot q(s) \cdot d(s) \cdot P_n^3 \cdot l(s) \cdot o(s).$$

Вторая петля первого порядка состоит из следующих последовательно соединенных ветвей:  $(1 - P_n)$ ,  $z(s)$ , and  $q(s)$ . Ее эквивалентная функция имеет вид:

$$(1 - P_n) \cdot z(s) \cdot q(s).$$

Аналогичным образом определяются третья и четвертая петли первого порядка и соответствующие им эквивалентные функции:

$$(1 - P_n) \cdot z(s) \cdot d(s);$$

$$(1 - P_n) \cdot z(s) \cdot l(s).$$

Петли второго порядка формируются следующим образом. Общее количество таких петель равно 3. Первая петля второго порядка формируется из второй и третьей петель первого порядка. Результирующее выражение имеет вид:

$$(1 - P_n)^2 \cdot z^2(s) \cdot q(s) \cdot d(s) .$$

Вторая петля второго порядка формируется из третьей и четвертой петель первого порядка. Результирующее выражение для эквивалентной функции имеет следующий вид:

$$(1 - P_n)^2 \cdot z^2(s) \cdot d(s) \cdot l(s) .$$

Третья петля второго порядка формируется из второй и четвертой петель первого порядка аналогичным образом. В результате для эквивалентной функции получается следующее выражение:

$$(1 - P_n)^2 \cdot z^2(s) \cdot q(s) \cdot l(s) .$$

Наконец, можно сформировать только одну петлю третьего порядка. В нее входят все петли второго порядка, а эквивалентная функция принимает следующий вид:

$$(1 - P_n)^3 \cdot z^3(s) \cdot q(s) \cdot d(s) \cdot l(s) .$$

Используя уравнение Мейсона, можно сформировать эквивалентную функцию для всей сети. Она будет иметь следующий вид:

$$h(s) = \frac{w(s) \cdot q(s) \cdot d(s) \cdot P_n^3 \cdot l(s) \cdot o(s)}{R(s)} , \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} R(s) = & 1 - (1 - P_n) \cdot z(s) \cdot q(s) - (1 - P_n) \cdot z(s) \cdot d(s) - (1 - P_n) \cdot z(s) \cdot l(s) + \\ & + (1 - P_n)^2 \cdot z^2(s) \cdot q(s) \cdot d(s) + (1 - P_n)^2 \cdot z^2(s) \cdot d(s) \cdot l(s) + \\ & + (1 - P_n)^2 \cdot z^2(s) \cdot q(s) \cdot l(s) - (1 - P_n)^3 \cdot z^3(s) \cdot q(s) \cdot d(s) \cdot l(s) . \end{aligned} \quad (11)$$

Используя преобразование Лапласа и разложение Хевисайда [15], функцию распределения вероятности времени реализации кибератаки типа «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей» можно определить следующим образом:

$$F(t) = \sum_{k=1}^8 \frac{w \cdot q \cdot d \cdot P_n^3 \cdot l \cdot o \cdot (z + s_k)^3}{\phi(s_k)} \cdot \frac{1 - \exp[-s_k t]}{-s_k} , \quad (12)$$

где  $\phi(s_k)$  — условное обозначение полинома в знаменателе;  $s_k$  — разложение полюсов;  $w = 1/\overline{t_{start}}$ ;  $l = 1/\overline{t_{elem}}$ ;  $q = 1/\overline{t_{OS}}$ ;  $d = 1/\overline{t_{ser}}$ ;  $o = 1/\overline{t_{vul}}$ ;  $z = 1/\overline{t_{rep}}$ .

Многочлен  $\phi$  имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \phi(s_k) = & (w + s_k) \cdot [(1 - P_n) \cdot z \cdot [(1 - P_n)^2 \cdot z^2 \cdot q \cdot d \cdot l - [q \cdot (z + s)^2 \cdot \\ & \cdot (d + s) \cdot (l + s) - d \cdot (z + s)^2 \cdot (q + s) \cdot (l + s) - l \cdot (z + s)^2 \cdot (q + s) \cdot (d + s) + \\ & + (1 - P_n) \cdot z \cdot q \cdot d \cdot (z + s) \cdot (l + s) + (1 - P_n) \cdot z \cdot l \cdot d \cdot (z + s) \cdot (q + s) \\ & + (1 - P_n) \cdot z \cdot q \cdot l \cdot (z + s) \cdot (d + s) - (1 - P_n)^2 \cdot z^2 \cdot q \cdot d \cdot l]]]. \end{aligned}$$

Среднее время  $\bar{T}$ , затрачиваемое на реализацию кибератаки типа «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей», определяется следующим образом:

$$\bar{T} = \sum_{k=1}^8 \frac{w \cdot q \cdot d \cdot P_n^3 \cdot l \cdot o \cdot (z + s_k)^3}{\phi(s_k)} \cdot \frac{1}{(-s_k)^2}. \quad (13)$$

Значения эквивалентных функций, рассчитанных для стохастической сети, представленной на рисунке 4, и функций распределения времени для каждого этапа кибератаки типа «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей» представлены в таблице 1.

Таблица 1. Функции для оценки длительности этапов кибератаки типа «Сканирование сети и ее уязвимостей»

Содержание этапа	Эквивалентная функция	Функция распределения времени
Запуск программно-аппаратного комплекса (сетевого сканера)	$w(s) = \frac{w}{w + s}$	$W(t) = 1 - \exp[-wt]$
Определение сервисов на элементах сети	$l(s) = \frac{l}{l + s}$	$L(t) = 1 - \exp[-lt]$
Определение активных элементов атакуемой сети	$q(s) = \frac{q}{q + s}$	$Q(t) = 1 - \exp[-qt]$
Определение типов операционных систем на активных элементах сети	$d(s) = \frac{d}{d + s}$	$D(t) = 1 - \exp[-dt]$
Определение уязвимостей	$o(s) = \frac{o}{o + s}$	$O(t) = 1 - \exp[-ot]$
Повторный запуск сетевого сканера	$z(s) = \frac{z}{z + s}$	$Z(t) = 1 - \exp[-zt]$

Результаты расчетов  $F(t)$  и  $\bar{T}$  представлены в виде зависимостей на рисунке 5. В качестве исходных данных используются следующие значения средних времен реализации этапов атаки «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей» и вероятности перехода пользователя по ссылке:  $\overline{t_{start}} = 3$  мин,  $\overline{t_{elem}} = 7$  мин,  $\overline{t_{OS}} = 4$  мин,  $\overline{t_{ser}} = 5$  мин,  $\overline{t_{vul}} = 7$  мин,  $\overline{t_{rep}} = 3$  мин,  $P_n = 0,1, \dots, 0,9$ .

Анализ полученных зависимостей на рисунках 5а и 5б позволяет сделать вывод о том, что для реализации атаки «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей» с вероятностью  $P_n = 0,1$  требуется 280 минут и 33 минут при  $P_n = 0,9$ . Полученные зависимости позволяют оценить влияние вероятности нахождения активных элементов сети, типов операционных систем и сервисов (за время, не превышающее заданное) на значения функции распределения времени реализации атаки. Видно, что увеличение вероятности  $P_n$  уменьшает среднее время реализации атаки. Однако по мере возрастания значения  $P_n$  степень влияния на интегральную функцию распределения  $F(t)$  уменьшается. При преодолении значения  $P_n = 0,5$  степень этого влияния пренебрежимо мала.

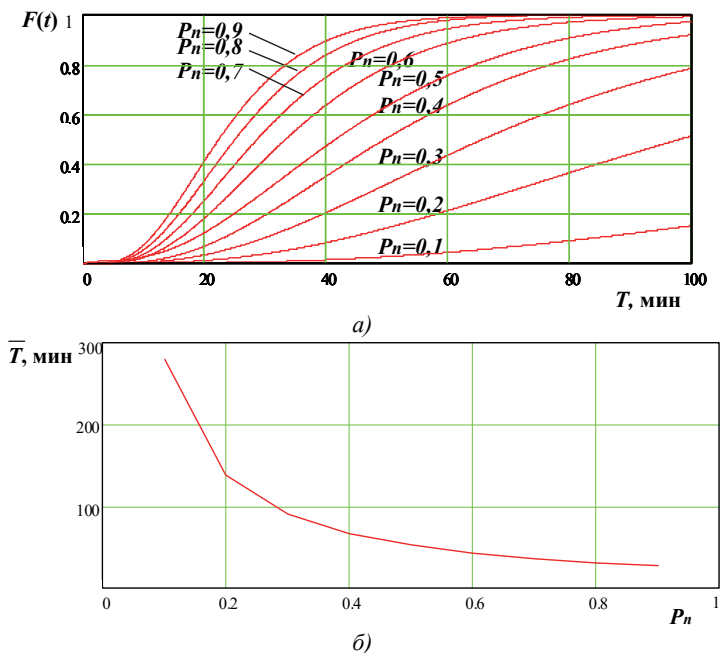


Рис. 5. Вероятностно-временные характеристики кибератаки типа «Сканирование сети и ее уязвимостей» (а – зависимость интегральной функции распределения вероятности от времени реализации кибератаки; б – зависимость среднего времени реализации кибератаки от вероятности  $P_n$ )

Среднее время реализации кибератаки также зависит от вероятности  $P_n$ . При значении  $P_n$ , превышающем 0.5, среднее время реализации этой атаки возрастает не очень сильно. Оно изменяется от 33 (при  $P_n = 0.9$ ) до 50 минут (при  $P_n = 0.5$ ). Если вероятность  $P_n < 0.5$  и далее уменьшается, то среднее время реализации атаки начинает существенно увеличиваться, достигая значения 280 минут при  $P_n = 0.1$ . Это означает, что при малом значении вероятности  $P_n$  злоумышленник не может с первого раза выявить правильно уязвимость, и ему приходится неоднократно повторять операцию сканирования. Чем меньше вероятность  $P_n$ , тем больше потребуются повторы и, следовательно, тем больше будет среднее время реализации атаки.

**5. Модель атаки «Отказ в обслуживании».** Пусть имеется компьютерная сеть, в состав которой входит  $n$  серверов, находящихся в постоянном ожидании запросов на подключение от удаленного объекта. Реализация атаки «Отказ в обслуживании» имеет следующие этапы:

- запуск и настройка программы, осуществляющей формирование и направление запросов, за среднее время  $\overline{t_{start}}$  с функцией распределения  $W(t)$ ;

- с вероятностью  $P_q$  направление запроса на сервер за среднее время  $\overline{t_{que}}$  с функцией распределения  $M(t)$ ;

- получение ответа от сервера за среднее время  $\overline{t_{srv}}$  с функцией распределения  $D(t)$ ;

- отправка большого количества («шторма») анонимных запросов на подключение от имени других объектов за среднее время  $\overline{t_{pack}}$  с функцией распределения  $L(t)$ ;

- переполнение очереди запросов сервера и нарушение работоспособности за среднее время  $\overline{t_{voil}}$  с функцией распределения  $Q(t)$ .

При этом получение ответа от сервера происходит с вероятностью  $P_n$ . С вероятностью  $(1 - P_n)$  запрос будет направлен повторно за среднее время  $\overline{t_{rep}}$  с функцией распределения  $Z(t)$ .

Кроме того, с вероятностью  $(1 - P_q)$  на атакуемый сервер может быть направлен некорректный, специально подобранный, запрос за среднее время  $\overline{t_{unq}}$  с функцией распределения  $O(t)$ . В этом случае при наличии ошибок в удаленной системе возможно заикливание процедуры обработки запроса и переполнение буфера с последующим зависанием серверов.

Стохастическая сеть, отражающая выше перечисленные этапы атаки «Отказ в обслуживании», представлена на рисунке 6.

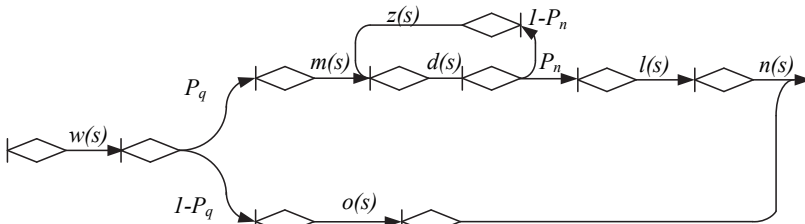


Рис. 6. Стохастическая сеть атаки «Отказ в обслуживании»

Порядок расчетов, по своей сути, аналогичен расчетам по предыдущей атаке. Поэтому сразу приведем расчетные выражения для интегральной функции распределения вероятностей и среднего времени реализации атаки. Функция распределения вероятностей  $F(t)$  будет иметь следующий вид:

$$F(t) = \sum_{k=1}^7 \frac{w \cdot P_q \cdot m \cdot P_n \cdot d \cdot l \cdot n \cdot (z + s_k) \cdot (o + s_k) + (1 - P_q) \cdot o \cdot [(d + s_k) \cdot (l + s_k) \cdot (n + s_k) \cdot (m + s_k) \cdot (z + s_k) - (1 - P_q) \cdot z \cdot m]}{\phi(s_k)} \cdot \frac{1 - \exp[-s_k t]}{-s_k}$$

Среднее время  $\bar{T}$ , затрачиваемое на реализацию кибератаки, определяется следующим выражением:

$$\bar{T} = \sum_{k=1}^7 \frac{w \cdot P_q \cdot m \cdot P_n \cdot d \cdot l \cdot n \cdot (z + s_k) \cdot (o + s_k) + (1 - P_q) \cdot o \cdot [(d + s_k) \cdot (l + s_k) \cdot (n + s_k) \cdot (m + s_k) \cdot (z + s_k) - (1 - P_q) \cdot z \cdot m]}{\phi(s_k)} \cdot \frac{1}{(-s_k)^2}$$

Результаты расчетов  $F(t)$  и  $\bar{T}$  представлены в виде зависимостей на рисунке 7. В качестве исходных данных используются следующие значения средних времен реализации этапов атаки «Отказ в обслуживании» и вероятности перехода пользователя по ссылке:  $\overline{t_{start}} = 5$  мин;  $\overline{t_{que}} = 3$  мин;  $\overline{t_{srv}} = 1$  мин;  $\overline{t_{pack}} = 9$  мин;  $\overline{t_{voil}} = 2$  мин;  $\overline{t_{rep}} = 3$  мин;  $\overline{t_{unq}} = 3$  мин;  $P_n = 0.1-0.9$ ;  $P_q = 0.5$ .



Анализ полученных зависимостей на рисунках 7а и 7б позволяет сделать вывод о том, что для реализации кибератаки «Отказ в обслуживании» с вероятностью  $P_n=0,1$  требуется 77 минут и 20 минут при  $P_n=0,9$ . При этом снижение вероятности  $P_n$  от 1 до 0.6 не приводит к существенному увеличению времени реализации атаки. Начиная со значения 0.6, уменьшение вероятности  $P_n$  оказывает существенное влияние на увеличение времени реализации атаки, которое возрастает в конечном итоге почти в 4 раза.

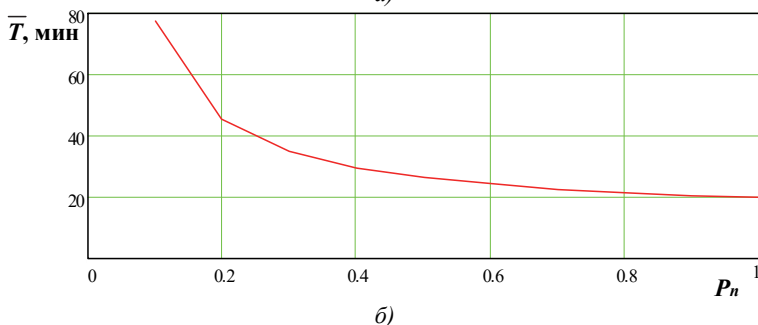
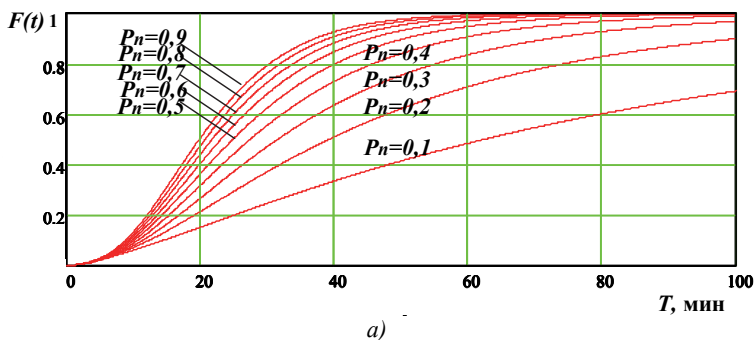


Рис. 7. Вероятностно-временные характеристики кибератаки типа «Отказ в обслуживании» (а – зависимость интегральной функции распределения вероятностей от времени реализации кибератаки; б – зависимость среднего времени реализации кибератаки от вероятности получения ответа от сервера)

Полученные зависимости позволяют оценить влияние вероятности получения ответов от сервера на подключение на значения функции распределения времени реализации атаки. Видно, что увеличение вероятности  $P_n$  уменьшает среднее время реализации кибератаки. Однако по

мере возрастания значения  $P_n$  степень влияния на интегральную функцию распределения  $F(t)$  уменьшается, и при преодолении значения  $P_n > 0,3$  степень этого влияния пренебрежимо мала.

**6. Экспериментальная оценка киберустойчивости.** С целью проверки полученных результатов проведен эксперимент. Для расчета коэффициента исправного действия в условиях воздействия кибератак была рассмотрена структура разветвленной компьютерной сети, включающая в себя персональные компьютеры (1000 шт.), коммутаторы (50 шт.), маршрутизаторы (15 шт.) и серверы (20 шт.).

Для расчета коэффициента исправного действия в условиях воздействия кибератак первоначально была проведена проверка особенностей вероятностно-временных характеристик на имитационном стенде. В состав имитационного стенда входили следующие модули: (1) ввода исходных данных, (2) генерации длительности этапов атаки, (3) менеджера. Модуль ввода исходных данных устанавливал значения  $\overline{t_W}$ ,  $\overline{t_L}$ ,  $\overline{t_M}$ ,  $\overline{t_D}$ ,  $\overline{t_Z}$  и  $P_n$ . Модули генерации с помощью датчика случайных чисел формировали случайным образом времена реализации этапов атаки. Менеджер формировал случайное значение для времени реализации всей атаки. При этом использовались значения, полученные на выходах модулей генерации, и вероятность  $P_n$ .

Полученные экспериментальные результаты приведены в таблице 2. Для каждого значения  $P_n$  проводилось 100 экспериментов. При этом использовались значения средних времен реализации этапов атак, представленные на рисунке 5 и рисунке 7.

Таблица 2. Экспериментальные результаты

$P_n$	Среднее время моделирования, мин		Равномерное распределение		
	Сканирование сети	Отказ в обслуживании	Среднее время, мин		Ошибка, %
			Сканирование сети	Отказ в обслуживании	
0,2	140	48	146,1	50,1	4,4
0,3	90	35	89,4	34,75	0,7
0,4	70	30	72,9	31,2	4,2
0,5	60	27	62,4	28,1	4,1
0,6	50	23	50,7	23,3	1,3
0,7	45	22	45,7	22,2	1,5
0,8	40	21	41,3	21,7	3,3
0,9	35	20	35,6	20,4	1,8

Как видно из таблицы 2, погрешность оценки времени реализации атаки не превышает 5 процентов. Следовательно, предложенная аналитическая модель и метод ее формирования являются достаточно корректными и адекватными.

Используя эти вероятностно-временные характеристики, были получены зависимости коэффициента исправного действия от количества маршрутов, представленные на рисунке 8 и рисунке 9. В качестве исходных данных использовались следующие значения:  $\alpha_i = 1$ ;  $\overline{t_{ent}} = 3$  мин;  $\overline{t_{tr}} = 1$  мин;  $\overline{t_{de}} = 2$  мин;  $\overline{t_{re}} = 10$  мин;  $\overline{t_{CA}} = 13$  мин.

Полученные зависимости коэффициентов исправного действия от количества маршрутов позволяют определить рациональный диапазон количества потребных маршрутов при воздействии кибератак. Из рисунка 8 и рисунка 9 видно, что чем больше количество направлений связи в компьютерной сети, тем выше киберустойчивость сети, которая определяется значением коэффициента исправного действия. Это справедливо, так как при большом количестве направлений связи выход одного и даже нескольких из них из строя не приводит к полному пропаданию работоспособности сети.

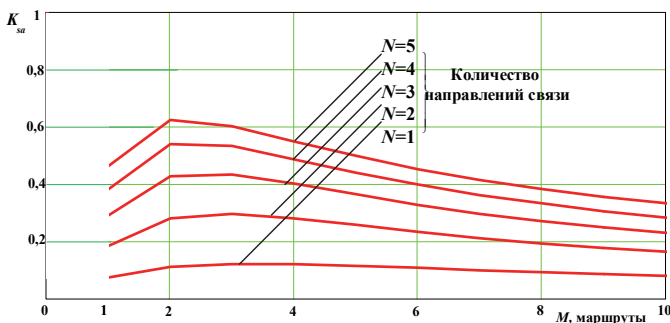


Рис. 8. Зависимость коэффициента исправного действия компьютерной сети от количества маршрутов и направлений связи

С другой стороны, киберустойчивость сети принимает максимальное значение при использовании для передачи информации от 2 до 5 маршрутов в зависимости от количества направлений связи в компьютерной сети. Это объясняется возможностью сформировать в сети обходные маршруты, по которым будет осуществляться передача данных в случае выхода из строя основных маршрутов. Однако дальнейшее увеличение количества маршрутов приводит к снижению киберустойчивости.

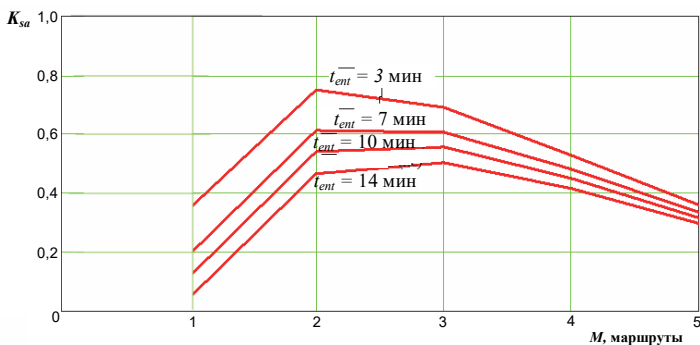


Рис. 9. Зависимость коэффициента исправного действия компьютерной сети от количества маршрутов и времени вхождения в связь

С другой стороны, киберустойчивость сети принимает максимальное значение при использовании для передачи информации от 2 до 5 маршрутов в зависимости от количества направлений связи в компьютерной сети. Это объясняется возможностью сформировать в сети обходные маршруты, по которым будет осуществляться передача данных в случае выхода из строя основных маршрутов. Однако дальнейшее увеличение количества маршрутов приводит к снижению киберустойчивости.

Этот неожиданный результат объясняется тем, что злоумышленник может использовать дополнительные маршруты для своих корыстных целей, что приведет к увеличению активности кибератак. При этом следует заметить, что снижение киберустойчивости сети при достаточно большом количестве маршрутов демонстрирует необходимость перехода от распределенной структуры компьютерной сети, пример которой представлен на рисунке 1, к структуре типа «звезда».

Кроме того, из рисунка 9 видно, что коэффициент исправного действия принимает максимальное значение в случае использования сетевых средств, обладающих наибольшей оперативностью. Иными словами, коммуникационные средства с большим временем вхождения в связь уменьшают киберустойчивость, так как при этом увеличивается время нахождения интервала на маршруте и маршрута в целом в исправном состоянии. Этот вывод также следует из выражения (2), которое определяет порядок вычисления коэффициента исправного действия исходя из длительности отдельных этапов работы компьютерной сети в условиях воздействия кибератак.

Приведенные экспериментальные данные подтверждают достоверность и обоснованность предлагаемого метода и возможность его

использования для оценки киберустойчивости в компьютерных сетях, в которых определяющую роль играют коммуникационные сервисы.

**7. Заключение.** В настоящей статье предложен новый подход к аналитическому моделированию кибератак, основанный на методе преобразования стохастических сетей. Сущность данного подхода заключается в замене множества элементарных ветвей стохастической сети одной эквивалентной ветвью и последующем определении эквивалентной функции сети, а также начальных моментов и функции распределения случайного времени реализации кибератаки.

Проверка предложенного подхода произведена для моделирования кибератак типа «Сканирование сети и выявление ее уязвимостей» и «Отказ в обслуживании», которые являются одними из наиболее распространенных и опасных для компьютерных сетей.

Предложенный метод оценки устойчивости компьютерной сети в условиях кибератак, или киберустойчивости компьютерной сети, позволяет определить показатели, ее характеризующие, и обосновать ее наиболее устойчивую структуру. Применение эталонных моделей кибератак и метода преобразования стохастических сетей позволяет вычислить вероятностно-временные характеристики известных атак как исходные данные, необходимые для оценки угроз и обоснования требований по защите информации в сети.

Определяя дальнейшие направления исследований, следует отметить, что в представленном в статье подходе к оценке киберустойчивости было принято ограничение, согласно которому новая кибератака начинается через некоторое время после того, как была обнаружена предыдущая, и были устранены последствия ее реализации. Такой случай следует рассматривать как частный случай, при котором на компьютерную сеть воздействует только один злоумышленник. В реальности одновременно действующих злоумышленников может быть достаточно много, и кибератаки, активируемые ими, могут накладываться друг на друга. Такой случай проведения массированных кибератак следует считать одним из направлений дальнейших исследований.

Другое ограничение рассмотренного подхода связано с тем, что сценарии возможных атак заранее считаются известными, а сценарии реализации мер противодействия атак не рассматриваются. В то же время множество возможных сценариев противодействия кибератакам является конечным.

По этой причине можно построить аналитические модели для реализации контрмер и интегрировать их с аналитическими моделями кибератак. В результате получится интегрированная аналитическая модель поведения компьютерной сети в условиях кибервоздействий, поз-

воляющая оценивать и выбирать наиболее эффективные меры противодействия. Это направление следует также считать достаточно перспективным для дальнейших исследований.

### Литература

1. *Luvanda A., Kimani S., Kimwele M.* Identifying Threats Associated With Man-In-The Middle Attacks during Communications between a Mobile Device and the Back End Server in Mobile Banking Applications // IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE). 2014. vol. 12(2). pp. 35–42.
2. *Sterbenz J.P.G. et al.* Modelling and Analysis of Network Resilience // Proceedings of the Third IEEE International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS). 2011. pp. 1–10.
3. *Sterbenz J.P.G. et al.* Resilience and Survivability in Communication Networks: Strategies, Principles, and Survey of Disciplines // Computer Networks: Special Issue on Resilient and Survivable Networks (COMNET). 2010. vol. 54(8). pp.1245–1265.
4. *Smith P. et al.* Network resilience: a systematic approach // IEEE Communications Magazine. 2011. vol. 49(7). pp. 88–97.
5. *Ganin A.A. et al.* Operational resilience: Concepts, design and analysis // Scientific Reports. 2015. vol.6. Article 19540.
6. *Kelly F., Yudovina E.* Stochastic Networks // Cambridge University Press. 2014. 222 p.
7. *Котенко И.В., Саенко И.Б.* SIEM-системы для управления информацией и событиями безопасности // «Защита информации. Инсайд». 2012. № 5. С. 54–65.
8. *Котенко И.В., Саенко И.Б.* Построение системы интеллектуальных сервисов для защиты информации в условиях кибернетического противоборства // Труды СПИИРАН. 2012. Вып. 3(22). С.84–100.
9. *Саенко И.Б., Лаута О.С., Котенко И.В.* Применение метода преобразования стохастических сетей для моделирования мобильных банковских атак // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 11. С. 928–933.
10. *Srikant R., Ying L.* Communication Networks: An Optimization, Control, and Stochastic Networks Perspective // Cambridge University Press. 2014. 363 p.
11. *Robert P.* Stochastic Networks and Queues // Springer Science & Business Media. 2013. 399 p.
12. *Williams J.* Laplace Transforms // Problem Solvers. George Allen & Unwin. 1973. 91 p.
13. *Van Valkenburg M.E.* Network Analysis: 3rd ed. // Englewood Cliffs. 1974. 571 p.
14. *Phillips D.T., Garsia-Diaz A.* Fundamentals of Network Analysis // Prentice-Hall. Englewood Cliffs. NJ. 1981. 474 p.
15. *Petrova S.S.* Heaviside and the development of the symbolic calculus // Archive for History of Exact Sciences. 1981. vol. 37(1). pp. 1–23.

**Котенко Игорь Витальевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией проблем компьютерной безопасности, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: безопасность компьютерных сетей, в том числе управление политиками безопасности, разграничение доступа, аутентификация, анализ защищенности, обнаружение компьютерных атак, межсетевые экраны, защита от вирусов и сетевых червей, анализ и верификация протоколов безопасности и систем защиты информации, защита программного обеспечения от взлома и управление цифровыми правами, технологии моделирования и визуализации для противодействия кибер-терроризму. Число научных публикаций — 500. [ivkote@comsec.spb.ru](mailto:ivkote@comsec.spb.ru), <http://www.comsec.spb.ru>; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; п.т.: +7-(812)-328-71-81, Факс: +7(812)328-4450.

**Саенко Игорь Борисович** — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: автоматизированные информационные системы, информационная безопасность, обработка и передача данных по каналам связи, теория моделирования и математическая статистика, теория информации. Число научных публикаций — 350. [ibsaen@comsec.spb.ru](mailto:ibsaen@comsec.spb.ru), <http://www.comsec.spb.ru>; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-7181, Факс: +7(812)328-4450.

**Коцыняк Михаил Антонович** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (ВАС им. Буденного). Область научных интересов: противодействие иностранным техническим разведкам. Число научных публикаций — 200. [kot-c@yandex.ru](mailto:kot-c@yandex.ru); Тихорецкий проспект, 3, Санкт-Петербург, 194064; р.т.: +7(921)971-60-58.

**Лаута Олег Сергеевич** — к-т техн. наук, преподаватель кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого (ВАС им. Буденного). Область научных интересов: защита от компьютерных атак. Число научных публикаций — 79. [laos-82@yandex.ru](mailto:laos-82@yandex.ru); Тихорецкий проспект, 3, Санкт-Петербург, 194064; р.т.: +7(911)842-02-28.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-11-30029).

**I.V. KOTENKO, I.B. SAENKO, M.A. KOTSYNYAK, O.S. LAUTA**  
**ASSESSMENT OF CYBER-RESILIENCE OF COMPUTER**  
**NETWORKS BASED ON SIMULATION OF CYBER ATTACKS BY**  
**THE STOCHASTIC NETWORKS CONVERSION METHOD**

---

*Kotenko I.V., Saenko I.B., Kotsynyak M.A., Lauta O.S. Assessment of Cyber-Resilience of Computer Networks based on Simulation of Cyber Attacks by the Stochastic Networks Conversion Method.*

**Abstract.** The paper offers an approach for assessment of cyber-resilience of computer networks based on analytical simulation of computer attacks using a stochastic networks conversion method. The concept of cyber-resilience of computer networks is justified. The mathematical foundations of its assessment, allowing to calculate cyber-resilience indices by means of analytical expressions, are considered. The coefficient of serviceability on cyber-resilience is offered to be used as the key such indicator. The considered approach assumes the creation of analytical models of cyber-attacks. The method of the stochastic networks conversion is applied to create analytical models of cyber-attacks. The time distribution function and average time to implement cyber-attacks are the simulation results. These estimates are used then to search cyber-resilience indices. The experimental results of analytical simulation which showed that the offered approach has rather high accuracy and stability of the received solutions are given.

**Keywords:** cyber security, cyber-attacks, attack modeling, cyber-resilience, stochastic network, Laplace transform.

---

**Kotenko Igor Vitalievich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of computer security problems laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: computer network security, including security policy management, access control, authentication, network security analysis, intrusion detection, firewalls, deception systems, malware protection, verification of security systems, digital right management, modeling, simulation and visualization technologies for counteraction to cyber terrorism. The number of publications — 500. ivkote@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7-(812)-328-71-81, Fax: +7(812)328-4450.

**Saenko Igor Borisovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, leading researcher of computer security problems laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: automated information systems, information security, processing and transfer of data on data links, theory of modeling and mathematical statistics, information theory. The number of publications — 350. ibsaen@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-7181, Fax: +7(812)328-4450.

**Kotsynyak Mikhail Antonovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of security of special-purpose infocommunication systems department, S.M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps. Research interests: counteraction to foreign technical intelligence services. The number of publications — 200. kot-c@yandex.ru; Tikhoretsky avenue, 3, St. Petersburg, 194064, Russia; office phone: +7(921)971-60-58.

**Lauta Oleg Sergeyeovich** — Ph.D., lecturer of security of special-purpose infocommunication systems department, S.M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps. Research interests:



protection against the computer attacks. The number of publications — 79. laos-82@yandex.ru; Tikhoretsky avenue, 3, St. Petersburg, 194064, Russia; office phone: +7(911)842-02-28.

**Acknowledgements.** This research is supported by RSF (project № 15-11-30029).

## References

1. Luvanda A., Kimani S., Kimwele M. Identifying Threats Associated With Man-In-The-Middle Attacks during Communications between a Mobile Device and the Back End Server in Mobile Banking Applications. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCI)*. 2014. vol. 12(2). pp. 35–42.
2. Sterbenz J.P.G. et al. Modelling and analysis of network resilience. *Proceedings of the Third IEEE International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*. 2011. pp. 1–10.
3. Sterbenz J.P.G. et al. Resilience and Survivability in Communication Networks: Strategies, Principles, and Survey of Disciplines. *Computer Networks: Special Issue on Resilient and Survivable Networks (COMNET)*. 2010. vol. 54(8). pp. 1245–1265.
4. Smith P. et al. Network resilience: a systematic approach. *IEEE Communications Magazine*. 2011. vol. 49(7). pp. 88–97.
5. Ganin A.A. et al. Operational Resilience: Concepts, Design and Analysis. *Scientific Reports*. 2015. vol.6. Article 19540.
6. Kelly F., Yudovina E. *Stochastic Networks*. Cambridge University Press. 2014. 222 p.
7. Kotenko I.V., Saenko I.B. [SIEM-systems for security information and event management]. *«Zashhita informacii. Insajd» – «Information protection. Inside»*. 2012. vol. 5. pp. 54–65. (In Russ.).
8. Kotenko I.V., Saenko I.B. [Developing the system of intelligent services to protect information in cyber warfare] *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceeding*. 2012. vol. 3(22). 2012. pp. 84–100. (In Russ.).
9. Saenko I.B., Lauta O.S., Kotenko I.V. [Application of a stochastic networks conversion method for modeling mobile banking attacks]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions: Instrumentation*. 2016. vol.11. pp. 928–933. (In Russ.).
10. Srikant R., Ying L. *Communication Networks: An Optimization, Control, and Stochastic Networks Perspective*. Cambridge University Press, 2014. 363 p.
11. Robert P. *Stochastic Networks and Queues*. Springer Science & Business Media. 2013. 399 p.
12. Williams J. *Laplace Transforms. Problem Solvers*. George Allen & Unwin, 1973. 91 p.
13. Van Valkenburg M.E. *Network Analysis (3rd ed.)*. NJ: Prentice-Hall. 1974. 571 p.
14. Phillips D.T., Garsia-Diaz A. *Fundamentals of Network Analysis*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. NJ. 1981. 474 p.
15. Petrova S.S. Heaviside and the development of the symbolic calculus. *Archive for History of Exact Sciences*. 1981. vol. 37(1). pp. 1–23.

М.В. ГОФМАН, А.А. КОРНИЕНКО, Е.Т. МИРОНЧИКОВ, А.Б. НИКИТИН  
**ЦИФРОВОЕ МАРКИРОВАНИЕ АУДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ РОБАСТНОЙ СКРЫТОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ ВОЗДУШНЫЙ АУДИОКАНАЛ**

---

*Гофман М.В., Корниенко А.А., Мирончиков Е.Т., Никитин А.Б.* **Цифровое маркирование аудиосигналов для робастной скрытой акустической связи через воздушный аудиоканал.**

**Аннотация.** В этой работе развивается методика цифрового маркирования аудиосигналов, ориентированная на передачу данных через воздушный аудиоканал. Внедряемый цифровой маркер занимает весь слышимый частотный диапазон. Цифровой маркер кодирует один бит информации. Решение о значении переданного бита выносится на основании знака центрального значения взаимно-корреляционной функции. Предлагаются две методики построения цифрового маркера. Обе методики специально ориентированы на частотные свойства обычных аудиосигналов. Невысокая вычислительная сложность предлагаемого метода маркирования позволяет использовать его для беспроводного обмена информацией между обычными смартфонами. Методика позволяет выполнять цифровое маркирование как речевых, так и музыкальных аудиосигналов без появления каких-либо заметно слышимых артефактов. Информация внедряется в виде маркера в частотную область аудиосигнала путем амплитудной модуляции его частотных составляющих. Эта работа снабжена результатами имитационного моделирования и натурных экспериментов, подтверждающих применимость методики для скрытой передачи данных через воздушный аудиоканал.

**Ключевые слова:** цифровой маркер, аудиосигнал, скрытая передача данных, воздушный аудиоканал, акустическая связь, стегоаудиосигнал.

---

**1. Введение.** Процедура цифрового маркирования аудиосигналов лежит в основе системы скрытой передачи данных с помощью таких сигналов. Она включает в себя три этапа: этап построения маркера, этап внедрения маркера в аудиосигнал и этап выделения маркера из маркированного аудиосигнала. Цифровое маркирование аудиосигнала предполагает создание из информации такого маркера и его внедрение в аудиосигнал таким образом, что становится возможным его выделить даже при условии, что маркированный аудиосигнал или стегоаудиосигнал подвергнется преднамеренной или ненамеренной атаке, то есть процедура цифрового маркирования должна быть робастной ко всякого рода воздействиям.

Существующие методы маркирования в общем случае можно разделить на работающие во временной области и в областях преобразований [1]. Далее их можно подразделить еще на несколько подкатегорий и, таким образом, методы из временной области включают методы с выравниваем по времени [2, 3] и методы [4-6], использующие эхо, тогда как методы из области преобразований также можно подразделить на методы расширения спектра [7, 8], методы модуляции с индексным

квантованием (от англ. quantization index modulation) [9, 10], методы «патчворка» или «лоскута» (от англ. patchwork) [11, 12].

Частым приложением процедуры цифрового маркирования является защита авторских прав при распространении аудио, видео и изображений в цифровых форматах. В этих случаях внедряемый сигнал либо сообщает получателю какие-то авторские данные или лицензионные ограничения, либо предотвращает или запрещает неавторизованное копирование. Другой пример приложения — внедряемый сигнал может либо разрешать, либо запрещать копирование некоторому копирующему устройству, которое проверяет внедряемый сигнал перед выполнением процедуры дубликации. Или же, например, согласованный с неким стандартом проигрыватель дисков может проверить наличие маркера, перед тем как решать проигрывать диск или нет. Еще одним приложением методов цифрового маркирования является так называемое гибридное полосовое канальное цифровое аудиовещание [13].

В зависимости от рабочей частотной полосы воздушная акустическая связь может использовать как обычный смартфон, который способен проигрывать/записывать аудио (до 22 кГц), так и ультразвуковой приемопередатчик (свыше 22 кГц). Поэтому любое устройство, оснащенное аудиоинтерфейсом может быть использовано как устройство аудиосвязи. Таким образом, появляется альтернативный интерфейс беспроводной связи между смартфонами, помимо имеющихся Wi-Fi и Bluetooth, которые часто выключены, для экономии батареи и/или предотвращения нежелательных подключений. Воздушная акустическая связь в частотном диапазоне до 22 кГц исследуется в работах [14-17].

Далее в этой статье развивается подход, описанный в статье [18], использующий трехкратное кодирование передаваемых информационных битов перед передачей через воздушный аудиоканал. Предложенный в работе [18] подход показал свою устойчивость к искажающим влияниям воздушного аудиоканала. Однако он требовал использования двух различных последовательностей для кодирования значений бита информации. Особенностью предлагаемого далее подхода является кодирование битов в знаке корреляционной функции, что уменьшает требуемое количество последовательностей до одной и тем самым увеличивает потенциально возможную скорость передачи информации. Процедура передачи состоит из трех этапов. Первый этап заключается в получении кодового слова, соответствующего передаваемому биту — построение маркера. Второй — во внедрении этого кодового слова в аудиосигнал, в результате чего получается стегоаудиосигнал — марки-

рованный аудиосигнал. А третий этап состоит в восстановлении переданного бита из стегоаудиосигнала, полученного после передачи через воздушный аудиоканал.

**2. Этап 1: построение маркера для аудиосигнала.** Пусть требуется с помощью аудиосигнала осуществить скрытую передачу через воздушный аудиоканал двоичного символа  $x \in \{0, 1\}$ . Для выполнения процедуры кодирования информации — первого этапа цифрового маркирования — требуется три специальные последовательности, составленные из элементов множества  $\{+1, -1\}$ . Первые две последовательности:

$$\mathbf{a} = (\alpha(1) \quad \alpha(2) \quad \dots \quad \alpha(N_\alpha)), \quad (1)$$

$$\mathbf{\beta} = (\beta(1) \quad \beta(2) \quad \dots \quad \beta(N_\beta)) \quad (2)$$

должны обладать хорошими автокорреляционными свойствами.

С помощью третьей последовательности используется свойство обычных аудиосигналов, иметь близкие спектральные характеристики смежных последовательностей отсчетов. Поэтому третья последовательность:

$$\boldsymbol{\gamma} = (\gamma(1) \quad \gamma(2) \quad \dots \quad \gamma(N_\gamma)) \quad (3)$$

должна обладать следующим свойством: ее подпоследовательности из  $+1$ -ц и  $-1$ -ц должны быть короткими, обычно чем короче, тем лучше.

Процесс получения кодового слова по двоичному символу  $x$  следующий. Если  $x = 1$ , то выбирается последовательность  $\mathbf{a}$ , а если же  $x = 0$ , то последовательность  $-\mathbf{a}$ . Затем каждый элемент выбранной последовательности заменяется либо последовательностью  $\mathbf{\beta}$ , если он равен 1, либо последовательностью  $-\mathbf{\beta}$  в противном случае. И наконец, каждый элемент полученной последовательности также подвергается замене: элемент, равный 1, заменяется на последовательность  $\boldsymbol{\gamma}$ , тогда как элемент, равный  $-1$ , заменяется на последовательность  $-\boldsymbol{\gamma}$ . Итоговую последовательность можно представить в виде вектора-строки:

$$\mathbf{y}(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, x) = (y(1, \alpha(1), \beta(1), \gamma(1), x) \quad y(2, \alpha(1), \beta(1), \gamma(2), x) \quad \dots \quad y(N_\alpha N_\beta N_\gamma, \alpha(N_\alpha), \beta(N_\beta), \gamma(N_\gamma), x)), \quad (4)$$

где

$$y\left(\left(i-1\right)N_{\beta}N_{\gamma}+\left(j-1\right)N_{\gamma}+k,\alpha\left(i\right),\beta\left(j\right),\gamma\left(k\right),x\right)= \\ =\left(2x-1\right)\alpha\left(i\right)\beta\left(j\right)\gamma\left(k\right), \quad (5)$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, N_{\alpha}\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, N_{\beta}\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N_{\gamma}\}$ . Если воспользоваться операцией Кронекерова произведения, то:

$$y\left(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, \mathbf{\gamma}, x\right)=\left(2x-1\right)\mathbf{a} \otimes \mathbf{\beta} \otimes \mathbf{\gamma}, \quad (6)$$

где  $\otimes$  — это оператор Кронекерова произведения.

Видно, что такой способ кодирования обладает небольшой скоростью, однако этот подход легко адаптировать для передачи не одного бита, а последовательностей бит. Например, когда требуется передавать последовательности из 4-х бит:  $\mathbf{x}_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$ ,  $\mathbf{x}_1 = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$  и так далее до  $\mathbf{x}_{15} = (1 \ 1 \ 1 \ 1)$ . Тогда вместо одной последовательности  $\mathbf{a}$  используется несколько последовательностей  $\mathbf{a}_i$ , где  $i \in \{0, 1, \dots, 7\}$ , которые помимо хороших автокорреляционных свойств имеют слабую взаимную корреляцию. В таком случае можно последовательность  $\mathbf{x}_i$  кодировать последовательностью  $y\left(\mathbf{a}_i, \mathbf{\beta}, \mathbf{\gamma}, 1\right)$ , а последовательность  $\mathbf{x}_{15-i}$  кодировать последовательностью  $y\left(\mathbf{a}_i, \mathbf{\beta}, \mathbf{\gamma}, 0\right)$ . Если же использовать еще и различные последовательности  $\mathbf{\beta}$ , обладающие хорошими автокорреляционными свойствами, но имеющими слабую взаимную корреляцию, то можно добиться еще большей скорости передачи, так как в таком случае такими же будут корреляционные свойства у итоговых последовательностей  $y$ .

**3. Этап 2: внедрение маркера в аудиосигнал.** Внедрение маркера в аудиосигнал составляет второй этап предлагаемого процесса скрытой передачи информации. Пусть задан цифровой аудиосигнал:

$$\mathbf{z}=\left(z\left(1\right) \ z\left(2\right) \ \dots \ z\left(N_z\right)\right), \quad (7)$$

где  $z(i)$  — это  $i$ -й отсчет цифрового аудиосигнала, принимающий значения из диапазона  $[-1, 1]$ ; а  $N_z$  — количество отсчетов, при этом:

$$N_Z = K_{\text{блок}} N_{\text{блок}}, \quad (8)$$

где

$$K_{\text{блок}} = N_{\alpha} N_{\gamma}, \quad (9)$$

а  $N_{\text{блок}}$  — четное число, удовлетворяющее следующему неравенству:

$$N_{\text{блок}} \geq 2(N_{\beta} + 1). \quad (10)$$

Элементы вектора (4) встраиваются в цифровой аудиосигнал (7), в результате этого получается такого же размера стегоаудиосигнал:

$$\mathbf{z}' = (z'(1) \quad z'(2) \quad \dots \quad z'(N_Z)), \quad (11)$$

где  $z'(i) \in [-1, +1]$  — это  $i$ -й отсчет цифрового стегоаудиосигнала.

Процесс встраивания начинается с разбиения вектора (7) на блоки, которые затем подвергаются прямому дискретному преобразованию Фурье, что позволяет перейти в частотную область и получить спектральные линии соответствующих блоков отсчетов. Путем амплитудной модуляции получаемых спектральных линий элементы вектора (4) встраиваются в скрывающий сигнал (7). Завершением процесса построения стегоаудиосигнала (11) является применение обратного дискретного преобразования Фурье к модифицированным спектральным линиям, а также нормировка, в результате и получается временной сигнал (11). Далее приводится детальное описание этого процесса.

Блоки, на которые разбивается вектор (7), представляют собой векторы из отсчетов:

$$\mathbf{z}_{\text{блок}}(j) = (z(N_{\text{блок}}(j-1)+1) \quad z(N_{\text{блок}}(j-1)+2) \quad \dots \quad z(N_{\text{блок}}j)), \quad (12)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ . Блок подвергается прямому дискретному преобразованию Фурье, что дает вектор спектральных линий:

$$\mathbf{Z}_{\text{блок}}(j) = (Z_{\text{блок}}(j,1) \quad Z_{\text{блок}}(j,2) \quad \dots \quad Z_{\text{блок}}(j, N_{\text{блок}})), \quad (13)$$

где

$$Z_{\text{блок}}(j, k) = \sum_{k=1}^{N_{\text{блок}}} z(N_{\text{блок}}(j-1) + k) \exp\left(-\frac{\iota 2\pi(j-1)(k-1)}{N_{\text{блок}}}\right), \quad (14)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}\}$ ,  $\iota = \sqrt{-1}$  — мнимая единица.

Прежде чем описать процесс применяемой амплитудной модуляции введем дополнительные объекты, которые нам потребуются. Пусть для  $j$ -го ( $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ ) блока спектральных линий множества:

$$\mathbf{A}_{\text{НЛ}}(j) = \{A_{\text{НЛ}}(j, 1), A_{\text{НЛ}}(j, 2), \dots, A_{\text{НЛ}}(j, N_{\beta})\} \quad (15)$$

и

$$\mathbf{A}_{\text{СВ}}(j) = \{A_{\text{СВ}}(j, 1), A_{\text{СВ}}(j, 2), \dots, A_{\text{СВ}}(j, N_{\beta})\} \quad (16)$$

обозначают номера модифицируемых спектральных линий и величины сил встраивания соответственно. Номера линий  $A_{\text{НЛ}}(i, j)$  удовлетворяют следующим неравенствам:

$$1 < A_{\text{НЛ}}(j, 1) < A_{\text{НЛ}}(j, 2) < \dots < A_{\text{НЛ}}(j, N_{\beta}) \leq \frac{N_{\text{блок}}}{2}. \quad (17)$$

Величины сил встраивания  $A_{\text{СВ}}(j, i)$  представляют собой положительные вещественные числа обычно значительно меньшие единицы  $A_{\text{СВ}}(j, i) \ll 1$ .

Встраивание происходит в частотную область, а именно в амплитуду спектральных линий. Количество спектральных линий  $N_{\text{блок}}$  в каждом блоке и число блоков  $K_{\text{блок}}$  в получаемом стегоаудиосигнале (11) не отличаются от таких же величин в исходном аудиосигнале. Обозначим  $k$ -ю спектральную линию  $j$ -го блока отсчетов стегоаудиосигнала (11) символом  $Z'_{\text{блок}}(j, k)$ , тогда для первой половины блока спектральных линий будет выполняться следующее равенство:

$$Z'_{\text{блок}}(j, k) = \begin{cases} Z_{\text{блок}}(j, k) \left(1 + A_{\text{СВ}}(j, i) y(m(j, i))\right), & \text{если } k = A_{\text{НЛ}}(j, i), \\ Z_{\text{блок}}(j, k), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (18)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}/2\}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, N_{\beta}\}$ ,

$$m(j, i) = \left( (j-1) \bmod N_{\gamma} \right) + 1 + (i-1)N_{\gamma} + \left\lfloor \frac{j-1}{N_{\gamma}} \right\rfloor N_{\gamma} N_{\beta}, \quad (19)$$

где  $[a]$  — целая часть вещественного числа  $a$ . Спектральные линии  $j$ -го блока  $Z_{\text{блок}}(j, k)$  с номерами  $k$  из диапазона от  $(N_{\text{блок}}/2) + 1$  до  $N_{\text{блок}}$  для сохранения свойства сопряженной симметричности также подвергаются изменениям в соответствии со следующим равенством:

$$Z'_{\text{блок}}(j, k) = \begin{cases} \left( Z_{\text{блок}}(j, N_{\text{блок}} - k + 2) \right)^*, & \text{если } j \neq (N_{\text{блок}}/2) + 1, \\ Z_{\text{блок}}(j, k), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (20)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ ,  $k \in \left\{ (N_{\text{блок}}/2) + 1, (N_{\text{блок}}/2) + 2, \dots, N_{\text{блок}} \right\}$ ,  $(a)^*$  — число, комплексно сопряженное числу  $a$ .

Таким образом, вместо исходных блоков спектральных линий получаются блоки модифицированных спектральных линий. Однако, чтобы перейти во временную область требуется выполнить обратное дискретное преобразование Фурье над каждым таким модифицированным блоком. Выполняя такие преобразования и объединяя их результаты, получим вещественный цифровой стегоаудиосигнал (11), элементы которого удовлетворяются равенству:

$$z' \left( (j-1)N_{\text{блок}} + i \right) = \frac{1}{N_{\text{блок}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{блок}}} Z'_{\text{блок}}(j, k) \exp \left( \frac{\iota 2\pi (i-1)(k-1)}{N_{\text{блок}}} \right), \quad (21)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}\}$ ,  $\iota = \sqrt{-1}$  — мнимая единица.

Значения величин (21) могут оказаться вне диапазона  $[-1, 1]$ . Поэтому завершающим этапом построения стегоаудиосигнала (11) явля-



ется нормировка значений его отсчетов. Мультипликативный нормирующий коэффициент, например, может быть получен на основании всех величин (21), таким образом:

$$\theta = \frac{1}{\max \left\{ \left| z'(1) \right|, \left| z'(2) \right|, \dots, \left| z'(N_Z) \right| \right\}}, \quad (22)$$

где  $|a|$  — абсолютное значение числа  $a$ . Или же нормировка может выполняться поблоково, в таком случае задержка перед отправкой стегоаудиосигнала в канал уменьшается.

**4. Этап 3: выделение скрытой информации из стегоаудиосигнала после его передачи через воздушный аудиоканал.** Третий этап предлагаемого метода скрытой передачи информации состоит в выделении из стегоаудиосигнала, принятого микрофоном, внедренной информации. Стегоаудиосигнал (11) передается через воздушный аудиоканал. Пусть на выходе аудиоканала выполняется дискретизация с частотой  $F_s$ , равной частоте отправки отсчетов стегоаудиосигнала (11) в аудиоканал. Таким образом, из-за шумов на выходе канала, а также из-за отсутствия синхронизации между передатчиком и приемником получается последовательность отсчетов:

$$r(1), r(2), \dots, r(N_Z), r(N_Z + 1), \dots, \quad (23)$$

в общем случае отличающихся от переданных.

Чтобы из этой последовательности выделить переданный сигнал (4), требуется определить ту подпоследовательность отсчетов, в которой он скрыт. Поиск начинается с того, что последовательность (23) разбивается на перекрывающиеся подпоследовательности одинаковой длины  $N_Z$ . Обозначим отдельную подпоследовательность вектором:

$$\mathbf{r}(i_{\text{шаг}}) = \left( r(i_{\text{шаг}}) \quad r(i_{\text{шаг}} + 1) \quad \dots \quad r(i_{\text{шаг}} + N_Z - 1) \right), \quad (24)$$

где  $i_{\text{шаг}} \in \{1, 2, \dots\}$ .

Далее выполняются действия, некоторые из которых обратны, выполненным процедурой встраивания. Так, осуществляются дискретные преобразования Фурье над смежными блоками элементов вектора (24), при этом длина блока также, как и процедуре встраивания, равна  $N_{\text{блок}}$ ; например, первый блок можно описать вектором:

$$\left( r(i_{\text{шаг}}) \quad r(i_{\text{шаг}} + 1) \quad \dots \quad r(i_{\text{шаг}} + N_{\text{блок}} - 1) \right), \quad (25)$$

а второй блок — вектором:

$$\left( r(i_{\text{шаг}} + N_{\text{блок}}) \quad r(i_{\text{шаг}} + N_{\text{блок}} + 1) \quad \dots \quad r(i_{\text{шаг}} + 2N_{\text{блок}} - 1) \right), \quad (26)$$

и так далее. В результате этих преобразований каждый блок преобразуется в такой же размерности комплексный вектор — вектор спектральных линий. Обозначим  $i$ -ю спектральную линию  $j$ -го блока через

$$R(j, i, i_{\text{шаг}}) = \sum_{k=0}^{N_{\text{блок}}-1} r(i_{\text{шаг}} + (j-1)N_{\text{блок}} + k) \exp\left(-\frac{\iota 2\pi k(i-1)}{N_{\text{блок}}}\right), \quad (27)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}\}$ ,  $\iota = \sqrt{-1}$  — мнимая единица.

Вычислим абсолютные значения тех спектральных величин (27), в которых  $i \in \mathbf{A}_{\text{НЛ}}(j)$ , а потом вычислим натуральные логарифмы от этих абсолютных значений. Затем сформируем из результатов этих вычислений, выполненных для всех  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ , вектор

$$\mathbf{R}_{\text{НЛ}}(i_{\text{шаг}}) = \left( R_{\text{НЛ}}(1, i_{\text{шаг}}) \quad R_{\text{НЛ}}(2, i_{\text{шаг}}) \quad \dots \quad R_{\text{НЛ}}(K_{\text{блок}} N_{\beta}, i_{\text{шаг}}) \right) \quad (28)$$

где

$$R_{\text{НЛ}}(k, i_{\text{шаг}}) = \ln \left| R(k_1(k), A_{\text{НЛ}}(k_1(k), k_2(k)), i_{\text{шаг}}) \right|, \quad (29)$$

где  $k \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}} N_{\beta}\}$ ,

$$k_1(k) = \left\lfloor \frac{k-1}{N_{\beta}} \right\rfloor + 1, \quad (30)$$

$$k_2(k) = ((k-1) \bmod N_{\beta}) + 1. \quad (31)$$

Если же скрывающий сигнал (7) известен, то обычно после его вычитания:

$$R_{\text{НЛ}}(k, i_{\text{шаг}}) = \ln \left| R(k_1(k), A_{\text{НЛ}}(k_1(k), k_2(k)), i_{\text{шаг}}) \right| - \ln \left| Z(k_1(k), A_{\text{НЛ}}(k_1(k), k_2(k))) \right|, \quad (32)$$

вероятность успешного детектирования значительно увеличивается.

Учитывая, что длина вектора (28) кратна  $K_{\text{блок}} = N_{\alpha} N_{\gamma}$ , этот вектор можно переформатировать в матрицу  $\mathbf{D}(i_{\text{шаг}})$  размера  $N_{\gamma} \times N_{\alpha} N_{\beta}$ :

$$\mathbf{D}(i_{\text{шаг}}) = \begin{pmatrix} D(1, 1, i_{\text{шаг}}) & D(1, 2, i_{\text{шаг}}) & \cdots & D(1, N_{\alpha} N_{\beta}, i_{\text{шаг}}) \\ D(2, 1, i_{\text{шаг}}) & D(2, 2, i_{\text{шаг}}) & \cdots & D(2, N_{\alpha} N_{\beta}, i_{\text{шаг}}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D(N_{\gamma}, 1, i_{\text{шаг}}) & D(N_{\gamma}, 2, i_{\text{шаг}}) & \cdots & D(N_{\gamma}, N_{\alpha} N_{\beta}, i_{\text{шаг}}) \end{pmatrix}, \quad (33)$$

где

$$D(i, j, i_{\text{шаг}}) = R_{\text{НЛ}}(k, i_{\text{шаг}}), \quad (34)$$

где  $k \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}} N_{\beta}\}$ , а зависимость между целыми числами  $i, j, k$  является следующей:

$$i = \left\lfloor \left\lfloor \frac{k-1}{N_{\beta}} \right\rfloor \bmod N_{\gamma} \right\rfloor + 1, \quad (35)$$

$$j = \left\lfloor \frac{k-1}{N_{\beta} N_{\gamma}} \right\rfloor N_{\beta} + ((k-1) \bmod N_{\beta}) + 1. \quad (36)$$

*Цифровое корреляционное детектирование скрытого сигнала.* Вычислим линейную комбинацию строк матрицы (33) путем умножения этой матрицы слева на вектор (3). Применим к элементам вектора, получаемого в результате этого умножения, функцию:

$$\text{sign}(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a \geq 0, \\ -1, & \text{если } a < 0, \end{cases} \quad (37)$$

и получим вектор:

$$\mathbf{s}(i_{\text{шаг}}) = \left( s(1, i_{\text{шаг}}) \quad s(2, i_{\text{шаг}}) \quad \dots \quad s(N_{\alpha}N_{\beta}, i_{\text{шаг}}) \right), \quad (38)$$

где

$$s(i, i_{\text{шаг}}) = \text{sign} \left( \sum_{k=1}^{N_{\gamma}} \gamma(k) D(k, i, i_{\text{шаг}}) \right), \quad (39)$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, N_{\alpha}N_{\beta}\}$ . Результаты натуральных экспериментов показали, что в некоторых случаях для повышения вероятности успешности передачи выгодно отказаться от применения функции (37) в равенстве (39), то есть использовать такой вариант:

$$s(i, i_{\text{шаг}}) = \sum_{k=1}^{N_{\gamma}} \gamma(k) D(k, i, i_{\text{шаг}}). \quad (39a)$$

Переформируем вектор (38) в матрицу:

$$\mathbf{S}(i_{\text{шаг}}) = \begin{pmatrix} S(1, 1, i_{\text{шаг}}) & S(1, 2, i_{\text{шаг}}) & \dots & S(1, N_{\beta}, i_{\text{шаг}}) \\ S(2, 1, i_{\text{шаг}}) & S(2, 2, i_{\text{шаг}}) & \dots & S(2, N_{\beta}, i_{\text{шаг}}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(N_{\alpha}, 1, i_{\text{шаг}}) & S(N_{\alpha}, 2, i_{\text{шаг}}) & \dots & S(N_{\alpha}, N_{\beta}, i_{\text{шаг}}) \end{pmatrix}, \quad (40)$$

где

$$S(i, j, i_{\text{шаг}}) = s(k, i_{\text{шаг}}), \quad (41)$$

где  $k \in \{1, 2, \dots, N_{\alpha}N_{\beta}\}$ , а зависимость между  $i, j, k$  определяется следующими равенствами:

$$i = \left\lfloor \frac{k-1}{N_{\beta}} \right\rfloor + 1, \quad (42)$$

$$j = ((k-1) \bmod N_{\beta}) + 1. \quad (43)$$

Теперь вычислим скалярные произведения, между вектором (2) и теми векторами, которые извлечены из (28) и которые представляют

собой строки матрицы (40), скалярно умножив эту матрицу на вектор (2). К элементам вектора, полученного в результате этого умножения, применим функцию (37). И наконец, после применения этой функции вычислим скалярное произведение полученного вектора и вектора (1), что даст целое число:

$$\rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}}) = \sum_{i=1}^{N_{\alpha}} \alpha(i) \operatorname{sign} \left( \sum_{k=1}^{N_{\beta}} S(i, k, i_{\text{шаг}}) \beta(k) \right), \quad (44)$$

лежащее в диапазоне от  $-N_{\alpha}$  до  $N_{\alpha}$ .

Решение о том, что в векторе (24) скрыт вектор (4), будет положительным, если будут выполняться три условия. Первое условие заключается в том, чтобы выполнялось неравенство:

$$\left| \rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}}) \right| \geq \rho_{\text{порог}}, \quad (45)$$

где  $\rho_{\text{порог}}$  — это заданное положительное целое число, удовлетворяющее неравенству  $\rho_{\text{порог}} \leq N_{\alpha}$ .

Второе условие учитывает не только рассматриваемый вектор (24), но и  $W_{\text{справа}} - 1$  последующих векторов, а формулируется оно так: абсолютное значение  $\left| \rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}}) \right|$  должно быть наибольшим среди всех абсолютных значений  $\left| \rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}} + j) \right|$ , где  $j \in \{0, 1, \dots, W_{\text{справа}} - 1\}$ , то есть должно выполняться равенство:

$$\left| \rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}}) \right| = \max \left\{ \left| \rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}}) \right|, \left| \rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}} + 1) \right|, \dots, \left| \rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}} + W_{\text{справа}} - 1) \right| \right\}. \quad (46)$$

Обычно в качестве величины  $W_{\text{справа}}$  следует брать положительное целое число, не меньшее произведения  $N_{\text{блок}} N_{\gamma}$ .

Для упрощения формулирования третьего условия введем сумму:

$$\mu(i_{\text{шаг}}) = \sum_{i=1}^{N_{\alpha}} \left( \text{sign}(\rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}})) \alpha(i) N_{\beta} - \sum_{k=1}^{N_{\beta}} S(i, k, i_{\text{шаг}}) \beta(k) \right)^2. \quad (47)$$

Итак, третье условие: для последовательности (24)  $\mathbf{r}(i_{\text{шаг}})$  должно выполняться равенство:

$$\mu(i_{\text{шаг}}) = \min \left\{ \mu(i_{\text{шаг}} + j_1), \dots, \mu(i_{\text{шаг}} + j_K) \right\}, \quad (48)$$

где  $j_k \in \{j_1, \dots, j_K\} \subseteq \{0, 1, \dots, W_{\text{справа}} - 1\}$  — это такие целые числа, для которых выполняется равенство  $|\rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}})| = |\rho_{\text{цифр}}(i_{\text{шаг}} + j_k)|$ .

*Цифро-аналоговое корреляционное детектирование скрытого сигнала.* Помимо описанного выше цифрового метода результаты натуральных экспериментов показали полезность гибридного — цифро-аналогового метода. Процедура цифро-аналогового корреляционного детектирования выполняется следующим образом. Вначале вычисляется величина (44). Дальнейшие действия повторяют те, которые выполняются в цифровом подходе, однако в них не используется функция (37). Так, в цифро-аналоговом подходе элементы вектора (38) будут вычисляться по формуле (39а) и в общем случае окажутся вещественными числами. Матрица (40) будет состояться именно из вещественных значений (39а). В конце будет вычисляться величина:

$$\rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}}) = \sum_{i=1}^{N_{\alpha}} \alpha(i) \sum_{k=1}^{N_{\beta}} S(i, k, i_{\text{шаг}}) \beta(k). \quad (49)$$

Этот подход называется цифро-аналоговым, так как решение о наличии скрытого сигнала принимается не только на основании величины (49), но также используется величина (44). Есть два требования, которым должен удовлетворять вектор (24), чтобы было вынесено положительное решение о наличии в нем скрытого сигнала. Первое требование совпадает с первым требованием цифрового корреляционного детектирования, определенном неравенством (45). Второе требование состоит в том, что величина (49) должна удовлетворять равенству:

$$\left| \rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}}) \right| = \max \left\{ \left| \rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}}) \right|, \left| \rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}} + 1) \right|, \dots, \left| \rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}} + W_{\text{справа}} - 1) \right| \right\}. \quad (50)$$

Иногда оказывается полезным предъявлять еще и третье требование, заключающееся в том, чтобы величина (49) превосходила заданный вещественный порог  $\rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}})$ :

$$\rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}}) \geq \rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}}). \quad (51)$$

Выбор величины порога  $\rho_{\text{аналог}}(i_{\text{шаг}})$  зависит от условий пространства передаваемого стегоаудиосигнала. Также полезно сделать его зависимым от характеристик самого исходного аудиосигнала, однако в таком случае приемнику потребуются сведения об исходном аудиосигнале.

Следует отметить, что в цифро-аналоговом подходе при проверке первого требования может использоваться числовое значение  $\rho_{\text{порог}}$ , меньшее, чем значение этой же величины в цифровом подходе, когда выполняется обработка одной и той же принятой последовательности отсчетов, однако успешность детектирования при этом обычно оказывается выше.

*Восстановление переданного информационного бита.* Когда последовательность (24) удовлетворяет всем требованиям, указанным в выбранном способе корреляционного детектирования, тогда она рассматривается как содержащая скрытый сигнал (4). В таком случае значение скрытого бита вычисляется следующим образом:

$$x' = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{sign}(\rho(i_{\text{шаг}})) = 1, \\ 0, & \text{если } \text{sign}(\rho(i_{\text{шаг}})) = -1, \end{cases} \quad (52)$$

где  $\rho(i_{\text{шаг}})$  — это либо величина (44), либо величина (49), в зависимости от выбранного способа детектирования. Следует отметить, что искажения в канале могут повлиять так, что значение бита  $x'$  может не совпасть с значением переданного бита  $x$ .

**5. Две методики построения последовательностей  $\gamma$ .** В обычных аудиосигналах смежные блоки отсчетов:

$$\left( r(i_{\text{шаг}}) \quad r(i_{\text{шаг}} + 1) \quad \dots \quad r(i_{\text{шаг}} + jN_{\text{блок}} - 1) \right), \quad (53)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$  обладают очень близкими спектральными характеристиками. Поэтому полезно использовать такую последовательность (3), которая при вычислении элементов вектора (38) учитывает это свойство смежных блоков отсчетов. Опираясь на это свойство, элементы вектора (38) при небольшом шуме в канале и наличии скрытого сигнала (4) в рассматриваемом векторе (24) будут представлять собой слабо зашумленные элементы вектора (2).

Далее представлены две методики построения последовательностей (3). Первая методика предполагает, что последовательность (3) выбирается такая, которая обладает хорошими автокорреляционными свойствами, но при этом в ней подпоследовательности из  $+1$ -ц или  $-1$ -ц имеют небольшую длину. Однако в процессе вычисления элементов вектора (38) (см. равенства (39) или (39а)) первая методика не использует саму последовательность (3). Вместо нее используется другая последовательность  $\gamma'$ , вычисляемая следующим образом. Вначале вычисляется вектор  $\delta$ , представляющий собой разность между первыми  $N_\gamma - 1$  элементами вектора (3) и последними  $N_\gamma - 1$  элементами вектора (3):

$$\delta = \left( \delta(1) \quad \delta(2) \quad \dots \quad \delta(N_\gamma - 1) \right), \quad (54)$$

где

$$\delta(i) = \gamma(i) - \gamma(i + 1), \quad (55)$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, N_\gamma - 1\}$ ; смежные элементы вектора (3), которые равны между собой, приведут к появлению нулевого элемента в векторе (54). Далее пусть возрастающая последовательность положительных целых  $i_1, \dots, i_K$  составлена из порядковых номеров тех элементов вектора (54), которые не равны 0; при этом для простоты изложения будем считать, что  $i_0 = 0$  и  $i_{K+1} = N_\gamma$ . Используя эти целые числа и элементы вектора (3), сформируем вектор:

$$\gamma' = \left( \gamma'(1) \quad \gamma'(2) \quad \dots \quad \gamma'(N_\gamma) \right), \quad (56)$$

где



$$\gamma'(i) = \frac{\gamma(i)}{i_k - i_{k-1}}, \quad (57)$$

для всякого  $i_{k-1} < i \leq i_k$  при  $k \in \{1, 2, \dots, K + 1\}$ . Еще раз следует отметить, что в при использовании этой методики именно вектор (56) используется вместо вектора (3) в процедуре выделения. Использование в приемнике вектора (56) позволяет частично учесть в процессе детектирования спектральное сходство смежных блоков отсчетов. При выборе последовательности (3) среди последовательностей одинаковой длины для первой методики следует отдавать предпочтение той, которая порождает такую последовательность (56), у которой абсолютное значение суммы элементов меньше; например, между двумя последовательностями Баркера  $(1 \ -1 \ 1 \ 1)$  и  $(1 \ -1 \ -1 \ -1)$  следует выбирать вторую.

Вторая методика отличается от первой тем, что в ней используется некоторая последовательность:

$$\Phi = (\varphi(1) \ \varphi(2) \ \dots \ \varphi(N_\Phi)), \quad (58)$$

где  $\varphi(i) \in \{+1, -1\}$ , которая дублируется  $N_{\text{дубль}}$  раз. Дублирование при выборе подходящего вектора (58) будет увеличивать отношение максимального значения к минимальному значению автокорреляционной функции последовательности (3). После дублирования вектора (58) и объединения копий, каждый элемент объединенной последовательности заменяется на последовательность  $\eta$  четной длины  $N_\eta$ , первая половина которой состоит из одних единиц, а вторая — из минус единиц:

$$\eta = (\eta(1) \ \eta(2) \ \dots \ \eta(N_\eta)), \quad (59)$$

где

$$\eta(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } i \leq \frac{N_\eta}{2}, \\ -1, & \text{если } i > \frac{N_\eta}{2}, \end{cases} \quad (60)$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, N_\eta\}$ . При этом, когда выполняется замена, тогда заменяющая последовательность (59) масштабируется с коэффициентом,

представляющим собой заменяемый элемент. В итоге после замены получается последовательность (3), длина которой равна  $N_\gamma = N_{\text{дубль}} N_\phi N_\eta$ , а элементы удовлетворяют равенству:

$$\gamma(j) = \eta\left(\left((j-1) \bmod N_\eta + 1\right) \varphi\left(\left[\left[\frac{j-1}{2}\right] \bmod N_\phi + 1\right]\right)\right), \quad (61)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, N_\gamma\}$ ,  $[a]$  — целая часть числа  $a$ . Если использовать оператор произведения Кронекера, то последовательность (3) можно получить таким образом:

$$\gamma = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \otimes \phi \otimes \eta, \quad (62)$$

где первый вектор, составленный из одних единиц, имеет длину  $N_{\text{дубль}}$ , а  $\otimes$  — это оператор произведения Кронекера. Во второй методике, в отличие от первой, эта же последовательность (3) используется в процедуре вычисления элементов вектора (38). Выбор значения  $N_\eta$  следует делать с учетом того, сколько смежных блоков отсчетов аудиосигнала имеют приблизительно одинаковые амплитудные спектры. Вторая методика уже при передаче учитывает спектральное сходство смежных блоков отсчетов.

*Анализ свойств последовательностей  $\gamma$ .* Определим взаимную корреляционную функцию последовательностей  $\mathbf{a} = (a(1) \ a(2) \ \dots \ a(N))$ ,  $\mathbf{b} = (b(1) \ b(2) \ \dots \ b(N))$  из вещественных чисел следующим образом:

$$f_{\text{кор}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, i) \triangleq \sum_{j=1}^i a(j) b(N - i + j), \quad i \geq 1, \quad (63)$$

при этом будем считать, что  $a(k) = b(k) = 0$ , когда  $k > N$  или  $k \leq 0$ . Обозначим через  $F(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  абсолютное значение отношения максимального значения функции (63) к минимальному значению этой же функции, то есть:

$$F(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \triangleq \left| \frac{\max_{\forall i} \{f_{\text{кор}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, i)\}}{\min_{\forall i} \{f_{\text{кор}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, i)\}} \right|. \quad (64)$$

А также для краткости изложения обозначим через  $F(\mathbf{a})$  величину  $\left| \max_{\forall i} \{f_{\text{кор}}(\mathbf{a}, \mathbf{a}, i)\} / \min_{\forall i} \{f_{\text{кор}}(\mathbf{a}, \mathbf{a}, i)\} \right|$ .

Путем выбора подходящих последовательностей (1) и (2) можно добиться того, что будет выполняться как минимум приближенное равенство:

$$F(\mathbf{y}(\mathbf{a}, 1, 1, x)) \approx F(\mathbf{y}(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, 1, x)). \quad (65)$$

В качестве примера приведем следующий случай. Пусть последовательности (1) и (2) — это, соответственно, кодовые слова кодов Касами и Голда, длины которых 255 и 127. При этом в качестве кодового слова кода Касами будет использоваться последовательность, порождаемая регистром с обратной связью, описываемой полиномом  $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ . Тогда так в качестве кодового слова кода Голда будет использоваться последовательность, порождаемая регистром с обратной связью, описываемой полиномом  $x^7 + x^3 + x^2 + x + 1$ . При таких последовательностях (1) и (2) будет выполняться равенство (65), то есть замена элементов последовательности (1) на элементы последовательности (2) не приведет к изменению абсолютного значения отношения максимального значения автокорреляционной функции к ее минимальному значению. Действительно, когда информационный бит  $x = 1$ , тогда  $F(\mathbf{y}(\mathbf{a}, 1, 1, x)) = |-255 / 30| = 8.5$ , но при этом также выполняется равенство  $F(\mathbf{y}(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, 1, x)) = |-32385 / 3810| = 8.5$ .

Когда последовательности (1) и (2) таковы, что выполняется равенство (65), тогда особую важность приобретает выбор подходящей последовательности (3). Для простоты будем обозначать последовательности (3), получаемые первой или второй методикой построения, описанным выше, символами  $\gamma^{(1)}$  и  $\gamma^{(2)}(\Phi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta})$  соответственно. В таком случае именно последовательность (3) будет определять величину  $F(\mathbf{y}(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, \gamma^{(1)}, x), \mathbf{y}(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, \gamma', x))$ , когда используется первый способ построения последовательностей (3), и величину  $F(\mathbf{y}(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, \gamma^{(2)}(\Phi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}), x))$ , когда используется второй способ.

В таблице 1 приведены значения  $F(\mathbf{y}(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, \gamma^{(1)}, 1), \mathbf{y}(\mathbf{a}, \mathbf{\beta}, \gamma', 1))$  для некоторых последовательностей (3). В таблице 2 приведены некоторые из тех

последовательностей (58), которые при увеличении величины  $N_{\text{дубль}}$  увеличивают величину  $F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}\right), 1\right)\right)$ , а также указаны такие, которые не приводят к такому увеличению. При этом в качестве последовательностей (1) и (2) использовались упомянутые ранее последовательности Касами и Голда, длины которых 255 и 127 соответственно.

Таблица 1. Примеры зависимости абсолютного значения отношения максимальной величины корреляционной функции к ее минимальному значению от последовательностей (3) при использовании первого метода построения этих последовательностей

Последовательность $\gamma$	Величина $F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(1)}, 1\right), y\left(\alpha, \beta, \gamma', 1\right)\right)$
1, 1, -1	2
1, 1, 1, -1, -1, 1, -1	~3.01
1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, -1	~3.01

Таблица 2. Примеры зависимости абсолютного значения отношения максимальной величины корреляционной функции к ее минимальному значению от последовательностей (3) при использовании второго метода построения этих последовательностей

		$F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, 2\right), 1\right)\right)$		
Десятичный эквивалент	Последовательность $\varphi$	$N_{\text{дубль}} = 1$	$N_{\text{дубль}} = 10$	$N_{\text{дубль}} = 100$
1	1	2.033	1.0535	1.0051
1	1, -1	2.033	1.0535	1.0051
3	1, 1, -1	1.9892	2.8549	2.9848
13	1, -1, 1, 1	2.6812	2.0521	2.0051
1	1, -1, -1, -1	1.5948	1.9504	1.9949
3	1, 1, -1, -1, -1	1.4253	1.6389	1.6638
5	1, -1, 1, -1, -1, -1	2.3922	2.9257	2.9949

В целом о последовательностях (58), длины которых равны 3, 4 или 5 можно сказать следующее:

– среди последовательностей (58), длины 3, только последовательности (1, 1, 1) и (-1, -1, -1), которые соответствуют числам 7 и 0 соответственно, не приводят к увеличению

$F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}\right), 1\right)\right)$  при увеличении  $N_{\text{дубль}}$  при любом  $N_{\eta}$  Остальные с ростом величины  $N_{\text{дубль}}$  приближают значение  $F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}\right), 1\right)\right)$  к 3.

– среди последовательностей (58) длины 4 только двоичные последовательности, которые соответствуют числам из множества  $\{1, 7, 8, 14\}$ , увеличивают величину  $F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}\right), 1\right)\right)$  при увеличении  $N_{\text{дубль}}$  при любом  $N_{\eta}$ . Вторая половина этого множества может быть получена по первой путем обращения двоичных разрядов соответствующих чисел первой половины, например, числу 7 соответствует последовательность  $(1, 1, 1, -1)$ , а числу 8 — последовательность  $(-1, -1, -1, 1)$ . Выбирая элементы из этого множества и увеличивая  $N_{\text{дубль}}$  при любом допустимом  $N_{\eta}$ , значение  $F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}\right), 1\right)\right)$  приближается к 2.

– среди последовательностей (58) длины 5 только двоичные последовательности, которым соответствуют числа из множества  $\{1, 3, 7, 10, 15, 16, 21, 24, 28, 30\}$ , увеличивают величину  $F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}\right), 1\right)\right)$  при увеличении  $N_{\text{дубль}}$ , при любом допустимом  $N_{\eta}$ . Выбирая элементы из этого множества и увеличивая  $N_{\text{дубль}}$  при любом  $N_{\eta}$ , значение  $F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}\right), 1\right)\right)$  приближается к  $1\frac{2}{3}$ . Следует отметить, что при выборе последовательности (58), соответствующей числу из множества  $\{6, 12, 19, 25\}$ , величина  $F\left(y\left(\alpha, \beta, \gamma^{(2)}\left(\varphi, N_{\text{дубль}}, N_{\eta}\right), 1\right)\right)$  равна  $1\frac{2}{3}$  и вовсе не меняется при увеличении  $N_{\text{дубль}}$  при любом допустимом  $N_{\eta}$ .

**6. Экспериментальная оценка вероятности успешной передачи.** Основными параметрами предлагаемой методики являются по-

следовательности (1), (2), (3), сам исходный скрывающий (или несущий) сигнал (7), количество отсчетов  $N_{\text{блок}}$  в каждом блоке, в который будет выполняться встраивание, а также множество порядковых номеров спектральных линий  $\mathbf{A}_{\text{НЛ}}(j)$ , которые будут подвергнуты модификации, и множества величин сил встраивания  $\mathbf{A}_{\text{СВ}}(j)$ , где  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$ . При выполнении выделения скрытого сигнала важным параметром является размер окна  $W_{\text{справа}}$  считывания.

При выполнении имитационного моделирования, а также натуральных экспериментов в качестве последовательностей (1) и (2) будем использовать коды Касами и Голда, длины которых  $N_{\alpha} = 255$  и  $N_{\beta} = 127$  соответственно. Следовательно, количество блоков отсчетов, требуемых для встраивания скрытого сигнала будет равно  $K_{\text{блок}} = 255N_{\gamma}$ .

Размер блока отсчетов сделаем равным  $N_{\text{блок}} = 256$ , при этом в каждом из  $K_{\text{блок}}$  блоков для встраивания будут использоваться спектральные линии с одними и теми же порядковыми номерами от 2 до 128. Таким образом, для всех  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$  будут использовать одинаковые множества  $\mathbf{A}_{\text{НЛ}}(j) = \{2, 3, \dots, 128\}$ .

Силу встраивания сделаем равной 0.1 для любой спектральной линии; значит, для всех блоков  $j \in \{1, 2, \dots, K_{\text{блок}}\}$  и порядковых номеров  $k \in \{1, 2, \dots, N_{\text{блок}}\}$  будет  $A_{\text{СВ}}(j, k) = 0.1$ ; такая величина силы встраивания обычно обеспечивает слуховую транспарентность (неслышимость) скрываемого сигнала. Размер окна  $W_{\text{справа}} = 256N_{\gamma}$ .

*Результаты имитационного моделирования.* На вероятность успешной передачи влияют как условия распространения аудиосигнала, так и характеристики приемника и передатчика. Элемент матрицы  $\mathbf{D}(i_{\text{шаг}})$  (см. формулу (34)), расположенный в  $i$ -й строке и  $j$ -м столбце, будем моделировать как удовлетворяющий следующему равенству:

$$D(i, j; i_{\text{шаг}}) = \ln \left| h(i, j, i_{\text{шаг}}) Z'_{\text{блок}}(k_1(i, j), A_{\text{НЛ}}(k_1(i, j), k_2(j))) + n_{\text{фон}}(i, j, i_{\text{шаг}}) \right|, \quad (67)$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, N_{\gamma}\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, N_{\alpha}N_{\beta}\}$ ,

$$k_1(i, j) = \left\lfloor \frac{j-1}{N_\beta} \right\rfloor N_\gamma + i, \quad (68)$$

$$k_2(j) = ((j-1) \bmod N_\beta) + 1, \quad (69)$$

$h(i, j, i_{\text{шаг}})$  — это комплексный коэффициент передачи стегоаудиосигнала по воздушному аудиоканалу;  $n_{\text{фон}}(i, j, i_{\text{шаг}})$  — комплексный аддитивный шум, который представляет собой фоновый акустический шум, присутствующий в среде распространения стегоаудиосигнала. Будем предполагать, что величины  $h(i, j, i_{\text{шаг}})$  будут сохранять свои значения в течение временных интервалов передачи  $N_\gamma N_{\text{блок}}$  отсчетов стегоаудиосигнала, то есть интервалов времени, равных  $N_\gamma N_{\text{блок}} / F_s$  секундам, где  $F_s$  — частота дискретизации. Значит, будет выполняться следующая последовательность равенств  $h(1, j, i_{\text{шаг}}) = h(2, j, i_{\text{шаг}}) = \dots = h(N_\gamma, j, i_{\text{шаг}})$ ; такие модели каналов называются моделями с блоковыми замираниями, их разновидности рассмотрены в работах [19, 20].

В процедуре выделения скрытого сигнала не предполагалось знание приёмником скрывающего (несущего) аудиосигнала, вследствие этого его можно отнести к коэффициенту передачи  $h$ . Кроме этого, если учесть, что в процедуре встраивания применялась амплитудная модуляция частотных составляющих скрывающего аудиосигнала, то, внеся соответствующие изменения в приведенную выше модель, элемент матрицы  $\mathbf{D}(i_{\text{шаг}})$ , расположенный в  $i$ -й строке и  $j$ -м столбце, можно описать следующим равенством:

$$D(i, j, i_{\text{шаг}}) = \ln \left| h(i, j, i_{\text{шаг}}) \left( 1 + A_{\text{СВ}}(k_1(i, j), k_2(j)) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times y(k_3(i, j), \alpha(k_4(j)), \beta(k_2(j)), \gamma(i, x)) + n_{\text{фон}}(i, j, i_{\text{шаг}}) \right) \right|, \quad (70)$$

где

$$k_3(i, j) = (j-1)N_\gamma + i, \quad (71)$$

$$k_4(j) = \left\lfloor \frac{j-1}{N_\beta} \right\rfloor + 1, \quad (72)$$

тогда как величины  $k_1$  и  $k_2$  были определены равенствами (68) и (69). В качестве коэффициентов передачи и фонового шума будем использовать случайные гауссовы комплексные величины, а именно:

$$h(i, j, i_{\text{шаг}}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( h_1(j, i_{\text{шаг}}) + \iota h_2(j, i_{\text{шаг}}) \right), \quad (73)$$

$$n_{\text{фон}}(i, j, i_{\text{шаг}}) = \frac{\sigma_{\text{фон}}}{\sqrt{2}} \left( n_{\text{фон},1}(i, j, i_{\text{шаг}}) + \iota n_{\text{фон},2}(i, j, i_{\text{шаг}}) \right), \quad (74)$$

где  $\iota = \sqrt{-1}$  — мнимая единица, а  $h_1(j, i_{\text{шаг}})$ ,  $h_2(j, i_{\text{шаг}})$ ,  $n_{\text{фон},1}(i, j, i_{\text{шаг}})$  и  $n_{\text{фон},2}(i, j, i_{\text{шаг}})$  — это статистически независимые одинаково распределенные гауссовы случайные величины, имеющие нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию. Меняя вещественную величину  $\sigma_{\text{фон}}$ , мы будем изменять дисперсию амплитуды аддитивного шума, которая в таком случае будет равна  $\sigma_{\text{фон}}^2$ , тогда как дисперсия амплитуды мультипликативного шума будет оставаться неизменной и равной 1.

Так же, как и выше, обозначим через  $\gamma^{(1)}$  последовательность  $\gamma$ , полученную первым способом построения, а через  $\gamma^{(2)}(\Phi, N_{\text{дубль}}, N_{\text{п}})$  обозначим последовательность  $\gamma$ , полученную вторым способом. При выполнении имитационного моделирования использовались последовательности  $\gamma_1^{(1)} = \Phi_1$ ,  $\gamma_2^{(1)} = \Phi_2$ , а также  $\gamma^{(2)}(\Phi_1, 1, 2)$ ,  $\gamma^{(2)}(\Phi_2, 1, 2)$ ,  $\gamma^{(2)}(\Phi_1, 2, 2)$ ,  $\gamma^{(2)}(\Phi_2, 2, 2)$ , где  $\Phi_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$  и  $\Phi_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$ . Так, например:

$$\gamma^{(2)}(\Phi_1, 1, 2) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\gamma^{(2)}(\Phi_1, 2, 2) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Так как в приемнике при использовании первой методики вместо последовательности (3) используется (56), то, например, вместо  $\gamma_2^{(1)}$  в приемнике использовалась последовательность:

$$\gamma'_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Вероятность успешной передачи  $P_{\text{успех}}$  информационного бита  $x \in \{0, 1\}$  зависит от двух других: вероятности  $P_{\text{детект}}$  детектировать в



принятом сигнале скрытый сигнал и вероятности восстановления  $P_{\text{восст}}$  переданного бита. Первая вероятность зависит от того, найдется ли последовательность отсчетов (24) такая, которая будет удовлетворять всем требованиям, указанным ранее в описании процесса выделения скрытого сигнала. Вторая вероятность зависит от того, совпадет ли знак числа  $\rho(i_{\text{шаг}})$  в равенстве (52) со знаком числа  $2x - 1$ . Таким образом,

$P_{\text{успех}}$  определяется следующим равенством:

$$P_{\text{успех}} = P_{\text{детек}} P_{\text{восст}}. \quad (75)$$

Выполняя имитационное моделирование предполагалось, что для любой реализации матрицы (33) решение о наличии скрытого сигнала было положительным, это позволило сосредоточиться только на оценке вероятности восстановления  $P_{\text{восст}}$  переданного бита  $x$  при различных значениях дисперсии фонового шума  $\sigma_{\text{фон}}^2$ . Таким образом, выполняя имитационное моделирование, предполагалось,  $P_{\text{детек}} = 1$ , следовательно, выполнялось равенство  $P_{\text{успех}} = P_{\text{восст}}$ .

В таблицах 3 и 4 приведены результаты имитационного моделирования при различных значениях дисперсии фонового шума  $\sigma_{\text{фон}}^2$ .

Таблица 3. Таблица вероятностей успешного восстановления переданного бита для имитационного моделирования при использовании первой методики построения последовательностей (3)

Дисперсия амплитуды фонового шума, выраженная в дБ	$\sigma_{\text{фон}}^2$	Вероятность восстановления переданного бита $x$ (цифровое детектирование)	$P_{\text{восст}}$	Вероятность восстановления переданного бита $x$ (цифро-аналоговое детектирование)	$P_{\text{восст}}$
		результаты для последовательности $\gamma_1^{(1)}$			
30		0.5143		0.5221	
25		0.5385		0.5547	
20		0.6316		0.6712	
15		0.8389		0.9179	
10		0.9988		0.9999	
результаты для последовательности $\gamma_2^{(1)}$					
30		0.5139		0.5257	
25		0.5539		0.5827	
20		0.6714		0.7478	
15		0.9196		0.9801	

Таблица 4. Таблица вероятностей успешного восстановления переданного бита для имитационного моделирования при использовании второй методики построения последовательностей (3)

Дисперсия амплитуды фонового шума, выраженная в дБ	$\sigma_{\text{фон}}^2$	Вероятность восстановления переданного бита $x$ (цифровое детектирование)		Вероятность восстановления переданного бита $x$ (цифро-аналоговое детектирование)	
		$P_{\text{восст}}$	$P_{\text{восст}}$	$P_{\text{восст}}$	$P_{\text{восст}}$
результаты для последовательности $\gamma^{(2)}(\Phi_1, 1, 2)$					
30		0.5217		0.5226	
25		0.5570		0.5844	
20		0.6768		0.7494	
15		0.9196		0.9831	
результаты для последовательности $\gamma^{(2)}(\Phi_1, 2, 2)$					
30		0.5264		0.5373	
25		0.5872		0.6245	
20		0.7291		0.8368	
15		0.9715		0.9987	
результаты для последовательности $\gamma^{(2)}(\Phi_2, 1, 2)$					
30		0.5250		0.5416	
25		0.5751		0.6240	
20		0.7489		0.8477	
15		0.9821		0.9991	
результаты для последовательности $\gamma^{(2)}(\Phi_2, 2, 2)$					
30		0.5431		0.5606	
25		0.6217		0.6848	
20		0.8296		0.9272	
15		0.9988		0.9999	

По результатам видно, что предлагаемая методика скрытой передачи сигналов является очень устойчивой к аддитивному шуму. Это можно заключить на основании следующего. При дисперсии амплитуды фонового шума 15 дБ уже практически невозможно на слух различить сам стегоаудиосигнал, однако даже при такой дисперсии обеспечивается вероятность восстановления больше 0.8.

*Результаты натурных экспериментов.* Длительность скрытой передачи одного бита равна отношению  $N_{\alpha} N_{\gamma} N_{\text{блок}} / F_s$ , где  $F_s$  — ча-

стота выборки. Для примера рассчитаем эту длительность при следующих значениях параметров. Пусть последовательности (1) и (2) имеют длины  $N_\alpha = 255$  и  $N_\beta = 127$  двоичных символов соответственно. Значит, если  $N_{\text{блок}} = 256$ , то при использовании последовательности (3), длина которой  $N_\gamma = 3$ , и частоте выборки  $F_s = 32$  кГц окажется, что длительность скрытой передачи одного бита равна  $195840 / 32000 = 6.12$  секунды.

В реальных условиях, помимо характеристик аудиосистемы, включающей микрофон и динамик, на вероятность успешной передачи влияют: окружающий акустический шум, характеристики пути, который проходит стегоаудиосигнал от динамика до микрофона, характеристики самого исходного аудиосигнала, в который внедряется информация. Натурные эксперименты были выполнены в лабораторных условиях: тихое помещение, отсутствие препятствий между микрофоном и динамиком, а сами они неподвижны. Менялось только расстояние между динамиком и микрофоном. В качестве аппаратных средств передачи и приема аудиосигналов использовались динамики Sennheiser MX170, микрофон Philips SBC ME570. Мощность динамика в операционной системе Windows была установлена на 50% при проведении всех натурных экспериментов. Цифровая обработка аудиосигналов выполнялась с помощью программной среды MATLAB. Пороговое значение  $\rho_{\text{порог}}$  было задано равным 71.

При проведении экспериментов в качестве исходных аудиосигналов использовались следующие два их вида: речевая запись и музыкальная композиция. Речевой аудиосигнал характеризовался слабостью высоких частотных составляющих, так как она была записана в условиях, когда высокочастотные шумы имели очень малую мощность. В качестве музыкальной композиции использовалась песня «This Moment» музыкальной группы «In This Moment»; эта композиция характеризуется помимо низкочастотных составляющих наличием еще и мощных высокочастотных составляющих. Оба выбранных аудиосигнала позволяют выполнять внедрение с силой встраивания  $A_{\text{CB}}(j, i)$ , равной 0.1 для всех допустимых пар  $(j, i)$ , при этом не появляется каких-либо слышимых звуковых артефактов, вызванных внедрением скрытого сигнала.

По результатам натуральных экспериментов (таблица 5) передачи 100 бит информации можно сделать следующие выводы:

Таблица 5. Таблица вероятности успешной передачи, построенная по результатам натуральных экспериментов, при использовании цифрового детектирования

Используемая последовательность $\gamma$	Расстояние между динамиком и микрофоном (см)	50	60	70
	$\gamma_1^{(1)} = (1 \ 1 \ -1)$		0.95	0.98
$\gamma^{(2)}(\varphi_1, 1, 2) = (1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1)$		0.99	0.99	0.99

– использование речевой записи в качестве исходного аудиосигнала позволило выполнить успешную передачу на расстояние, не превышающее 5 см между динамиком и микрофоном; такое небольшое расстояние вызвано небольшой мощностью исходного аудиосигнала.

– использование указанной музыкальной композиции из-за своих частотных характеристик позволило значительно увеличить расстояние между динамиком и микрофоном (таблица 5); так, вероятность успешной передачи на расстоянии 70 см оказалась равной 0.99 при использовании последовательности  $\gamma^{(2)}(\varphi_1, 1, 2) = (1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1)$ , и равной 0.9 при использовании последовательности  $\gamma_1^{(1)} = (1 \ 1 \ -1)$ .

**7. Заключение.** В статье сформулированы свойства, которыми следует наделить скрываемую последовательность, чтобы повысить ее робастность к искажающим влияниям воздушного аудиоканала, когда используется предлагаемый метод цифрового маркирования аудиосигналов. Предложены способы построения последовательностей, обладающих подходящими свойствами. Способ детектирования наличия скрытого сигнала (цифрового маркера), предложенный в статье, является слепым, так как не требует знания приемником скрывающего сигнала. Простота предлагаемого в этой статье метода скрытой передачи данных позволяет применять его в режиме реального времени без необходимости требовать от передатчика и приемника значительной вычислительной мощности.

## Литература

1. *Hua G. et al.* Twenty years of digital audio watermarking — a comprehensive review // Signal Processing. 2016. vol. 128. pp. 222–242.
2. *Bassia P., Pitas I., Nikolaidis N.* Robust audio watermarking in the time domain // IEEE Transactions on multimedia. 2001. vol. 3. no. 2. pp. 232–241.
3. *Lemma A.N., Aprea J., Oomen W., Kerkhof L.V.D.* A temporal domain audio watermarking technique // IEEE transactions on signal processing. 2003. vol. 51. no. 4. pp. 1088–1097.
4. *Gruhl D., Lu A., Bender W.* Echo hiding // International Workshop on Information Hiding. 1996. pp. 295–315.
5. *Hu P., Peng D., Yi Z., Xiang Y.* Robust time-spread echo watermarking using characteristics of host signals // Electronics Letters. 2016. vol. 52. no. 1. pp. 5–6.
6. *Xiang Y. et al.* A dual-channel time-spread echo method for audio watermarking // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2012. vol. 7. no. 2. pp. 383–392.
7. *Kirovski D., Malvar H.S.* Spread-spectrum watermarking of audio signals // IEEE transactions on signal processing. 2003. vol. 51. no. 4. pp. 1020–1033.
8. *Verma C., Tarar S.* Secure Random Sequence based Frequency Hoping Spread Spectrum Audio Watermarking // International Journal of Engineering Science. 2016. vol. 6. no. 5. pp. 5026–5032.
9. *Chen B., Wornell G.W.* Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding // IEEE Transactions on Information Theory. 2001. vol. 47. no. 4. pp. 1423–1443.
10. *Tian H., Liu J., Li S.* Improving security of quantization-index-modulation steganography in low bit-rate speech streams // Multimedia systems. 2014. vol. 20. no. 2. pp. 143–154.
11. *Yeo I.K., Kim H.J.* Modified patchwork algorithm: A novel audio watermarking scheme // IEEE Transactions on speech and audio processing. 2003. vol. 11. no. 4. pp. 381–386.
12. *Xiang Y. et al.* Patchwork-based audio watermarking method robust to de-synchronization attacks // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing (TASLP). 2014. vol. 22. no. 9. pp. 1413–1423.
13. *Wang F. et al.* Simultaneous Broadcasting of Analog FM and Digital Signals by Separating Co-Channel FM Signals // IEEE Communications Letters. 2016. vol. 20. no. 11. pp. 2197–2200.
14. *Lee H., Kim T.H., Choi J.W., Choi S.* Chirp signal-based aerial acoustic communication for smart devices // IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). 2015. pp. 2407–2415.
15. *Nandakumar R., Chintalapudi K. K., Padmanabhan V., Venkatesan R.* Dhvani: secure peer-to-peer acoustic NFC // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2013. vol. 43. no. 4. pp. 63–74.
16. *Wang Q. et al.* Messages behind the sound: real-time hidden acoustic signal capture with smartphones // Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2016. pp. 29–41.
17. *Hanspach M., Goetz M.* On covert acoustical mesh networks in air // Journal of Communications. 2013. vol. 8. no. 11. pp. 758–767.
18. *Гофман М.В.* Методика скрытой передачи данных при связи через воздушный аудиоканал // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 51. С. 97–122.
19. *Collins A., Polyanskiy Y.* Dispersion of the coherent MIMO block-fading channel // IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). 2016. pp. 1068–1072.
20. *Гофман М.В.* Помехоустойчивое пространственное блочное кодирование // LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 176 с.

**Гофман Максим Викторович** — к-т техн. наук, доцент кафедры информатики и информационной безопасности, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: системы связи, системы передачи данных. Число научных публикаций — 17. [maxfog@gmail.com](mailto:maxfog@gmail.com); Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; р.т.: +7(812)310-34-72, Факс: +7(812)570-76-68.

**Корниенко Анатолий Адамович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и информационной безопасности, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: информатика, информационная безопасность. Число научных публикаций — 200. [kaa.pgups@yandex.ru](mailto:kaa.pgups@yandex.ru); Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; р.т.: +7(812)310-34-72, Факс: +7(812)570-76-68.

**Мирончиков Евгений Тимофеевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и информационной безопасности, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: теория информации. Число научных публикаций — 200. [etm937@yandex.ru](mailto:etm937@yandex.ru); Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; р.т.: +7(812)310-34-72, Факс: +7(812)570-76-68.

**Никитин Александр Борисович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и телемеханики на железных дорогах, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: автоматика и телемеханика на железных дорогах. Число научных публикаций — 200. [nikitin@crtc.spb.ru](mailto:nikitin@crtc.spb.ru); Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; р.т.: +7(812)310-07-88, Факс: +7(812)457-82-92.

M.V. GOFMAN, A.A. KORNIENKO, E.T. MIRONCHIKOV, A.B. NIKITIN  
**DIGITAL WATERMARKING OF AUDIO SIGNALS FOR ROBUST  
 HIDDEN AUDIO COMMUNICATION VIA AIR AUDIO CHANNEL**

Gofman M.V., Kornienko A.A., Mironchikov E.T., Nikitin A.B. **Digital Watermarking of Audio Signals for Robust Hidden Audio Communication via Air Audio Channel.**

**Abstract:** The article presents a digital audio watermarking method for air audio data transmission. The digital watermark occupies the whole frequency range of the audio signal. The digital watermark encodes one bit of information. A decision about transmitted bit is based on a sign of the center value of the mutual correlation function. Two methods to design the digital audio watermark are presented. Low complexity of presented methods of digital audio watermarking makes them suitable for use in smartphones. The method can be used in digital audio watermarking of both speech and music. Information is embedded via the digital watermark in the frequency domain of a host audio signal via amplitude modulation of its frequency constituents. The paper includes results of simulation modeling and natural experiments.

**Keywords:** digital watermark, audio signal, covert data transmission, air audio channel, acoustic telecommunication, steganography audio signal

**Gofman Maksim Viktorovich** — Ph.D., associate professor of informatics and information security department, Emperor Alexander I st. St. Petersburg State Transport University. Research interests: communication systems, systems of data transmission. The number of publications — 17. maxgof@gmail.com; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: +7(812)310-34-72, Fax: +7(812)570-76-68.

**Kornienko Anatoliy Adamovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of informatics and information security department, Emperor Alexander I st. St. Petersburg State Transport University. Research interests: informatics, information security. The number of publications — 200. kaa.pgups@yandex.ru; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: +7(812)310-34-72, Fax: +7(812)570-76-68.

**Mironchikov Evgenij Timofeevich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of informatics and information security department, Emperor Alexander I st. St. Petersburg State Transport University. Research interests: information theory. The number of publications — 200. etm937@yandex.ru; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: +7(812)310-34-72, Fax: +7(812)570-76-68.

**Nikitin Aleksandr Borisovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of automation and telemechanics on the railways department, Emperor Alexander I st. St. Petersburg State Transport University. Research interests: automation and telemechanics on railways. The number of publications — 200. nikitin@crtc.spb.ru; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: +7(812)310-07-88, Fax: +7(812)457-82-92.

## References

1. Hua G. et al. Twenty years of digital audio watermarking — a comprehensive review. *Signal Processing*. 2016. vol. 128. pp. 222–242.
2. Bassia P., Pitas I., Nikolaidis N. Robust audio watermarking in the time domain. *IEEE Transactions on multimedia*. 2001. vol. 3. no. 2. pp. 232–241.

3. Lemma A.N., Aprea J., Oomen W., Kerkhof L.V.D. A temporal domain audio watermarking technique. *IEEE transactions on signal processing*. 2003. vol. 51. no. 4. pp. 1088–1097.
4. Gruhl D., Lu A., Bender W. Echo hiding. International Workshop on Information Hiding. 1996. pp. 295–315.
5. Hu P., Peng D., Yi Z., Xiang Y. Robust time-spread echo watermarking using characteristics of host signals. *Electronics Letters*. 2016. vol. 52. no. 1. pp. 5–6.
6. Xiang Y. et al. A dual-channel time-spread echo method for audio watermarking. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2012. vol. 7. no. 2. pp. 383–392.
7. Kirovski D., Malvar H.S. Spread-spectrum watermarking of audio signals. *IEEE transactions on signal processing*. 2003. vol. 51. no. 4. pp. 1020–1033.
8. Verma C., Tarar S. Secure Random Sequence based Frequency Hopping Spread Spectrum Audio Watermarking. *International Journal of Engineering Science*. 2016. vol. 6. no. 5. pp. 5026–5032.
9. Chen B., Wornell G.W. Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2001. vol. 47. no. 4. pp. 1423–1443.
10. Tian H., Liu J., Li S. Improving security of quantization-index-modulation steganography in low bit-rate speech streams. *Multimedia systems*. 2014. vol. 20. no. 2. pp. 143–154.
11. Yeo I.K., Kim H.J. Modified patchwork algorithm: A novel audio watermarking scheme. *IEEE Transactions on speech and audio processing*. 2003. vol. 11. no. 4. pp. 381–386.
12. Xiang Y. et al. Patchwork-based audio watermarking method robust to de-synchronization attacks. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing (TASLP)*. 2014. vol. 22. no. 9. pp. 1413–1423.
13. Wang F. et al. Simultaneous Broadcasting of Analog FM and Digital Signals by Separating Co-Channel FM Signals. *IEEE Communications Letters*. 2016. vol. 20. no. 11. pp. 2197–2200.
14. Lee H., Kim T.H., Choi J.W., Choi S. Chirp signal-based aerial acoustic communication for smart devices. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). 2015. pp. 2407–2415.
15. Nandakumar R., Chintalapudi K.K., Padmanabhan V., Venkatesan R. Dhvani: secure peer-to-peer acoustic NFC. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2013. vol. 43. no. 4. pp. 63–74.
16. Wang Q. et al. Messages behind the sound: real-time hidden acoustic signal capture with smartphones. Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2016. pp. 29–41.
17. Hanspach M., Goetz M. On covert acoustical mesh networks in air. *Journal of Communications*. 2013. vol. 8. no. 11. pp. 758–767.
18. Gofman M.V. [A Method of Hidden Data in Communication via Air Audio Channel] *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. vol. 2(51). pp. 97–122. (In Russ.).
19. Collins A., Polyanskiy Y. Dispersion of the coherent MIMO block-fading channel. IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). 2016. pp. 1068–1072.
20. Gofman M.V. Pomehoustojchivoe prostranstvennoe blokovoje kodirovanie [Noiseproof space-time block coding]. LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 176 p. (In Russ.).



Д.А. КОЧАРОВ, А.П. МЕНЬШИКОВА  
**ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТОНАЦИОННО  
ВЫДЕЛЕННЫХ СЛОВ В РУССКОЯЗЫЧНОМ ТЕКСТЕ**

*Кочаров Д.А., Меньшикова А.П. Применение лингвистических признаков для автоматического определения интонационно выделенных слов в русскоязычном тексте.*

**Аннотация.** В данной статье предлагается метод автоматического предсказания интонационно выделенных слов, то есть наиболее важной информации в высказывании. Метод опирается на использование лексических, грамматических и синтаксических маркеров интонационного выделения, что делает возможным его применение в системах синтеза речи по тексту, где реализация интонационного выделения может повысить естественность звучания синтезированной речи.

В качестве методов классификации независимо друг от друга использовались несколько различных моделей: наивная байесовская модель, модель максимальной энтропии и условные случайные поля. Сопоставление результатов, полученных в ходе нескольких экспериментов, показало, что использовавшиеся дискриминативные модели демонстрируют сбалансированные и примерно равные значения метрик качества, в то время как генеративная модель потенциально более пригодна для поиска интонационно выделенных слов в речевом сигнале.

Результаты, представленные в статье, сравнимы и в некоторых случаях превосходят аналогичные системы, разработанные для других языков.

**Ключевые слова:** интонационное выделение, просодия, лексический анализ, синтаксический анализ, байесовский классификатор, метод максимальной энтропии, условные случайные поля, русский язык.

**1. Введение.** Интонационное выделение — это перцептивно значимое для носителей языка подчеркивание части устного высказывания, осуществляемое с помощью просодических средств: движения основного тона, интенсивности, длительности, тембра. С помощью интонации человек выделяет в высказывании наиболее важные слова. Интонационное выделение является одним из основных средств оформления информационной структуры и содержания высказываний наряду с лексическим составом и синтаксисом.

Интонационное выделение отдельных слов или словосочетаний повышает естественность звучания синтезированной речи и делает ее менее монотонной и более легко воспринимаемой, помогает слушателю понять, какая информация является в сообщении наиболее значимой. Последнее играет большую роль в таких приложениях, как диалоговые, информационно-справочные и навигационные системы, а повышение естественности звучания и простоты восприятия синтезированной речи важно при создании аудиокниг. Как было показано в ходе перцептивных исследований, описанных в [1], синтезированные высказывания, в которых присутствует

интонационное выделение, являются для большинства слушателей предпочтительными или более приятными на слух, чем нейтральные варианты, особенно в тех случаях, когда озвучиваются отрывки из художественной или детской литературы.

Существует достаточно много работ, посвященных автоматическому определению интонационного выделения [2-10]; большая их часть опирается не только на текстовые, но и на паралингвистические данные и анализ речевого сигнала. Такие системы достигают высоких результатов, однако могут быть применены при разработке систем автоматического распознавания и понимания речи, но не синтеза речи по тексту. В этом случае для предсказания того, какие фрагменты предложения могут быть акустически выделены, необходимо обращаться непосредственно к тексту и той информации, которую можно из него извлечь. Примерами исследований, где описываются такие подходы, могут служить работы [2-4], где для предсказания применялись такие критерии, как коммуникативный тип предложения, различные меры оценки частотности слов, мера TF-IDF (статистическая мера, используемая для оценки важности слова для конкретного документа), части речи слов и их гиперонимы (понятия, обозначающие семантические множества или группы, к которым относятся рассматриваемые слова), которые извлекаются с помощью семантических ресурсов (например WordNet). Однако подобные признаки зависят от конкретного языка, и их использование для русского языка требует адаптации.

В данной статье представлены результаты экспериментов по автоматическому определению интонационно выделенных слов в тексте с применением различных синтаксических, грамматических и лексических признаков. В статье сравниваются результаты, полученные при помощи трех разных классификаторов: наивного байесовского классификатора, метода максимальной энтропии и условных случайных полей. Полученные результаты сравнимы и в некоторых случаях превосходят аналогичные системы, разработанные для английского и японского языков.

**2. Классификационные признаки.** Благодаря тому, что явление просодической выделенности в русском языке всесторонне исследовано отечественными лингвистами, можно выделить наиболее распространенные маркеры рассматриваемого явления и выбирать признаки с опорой на них [11-15]. Такими маркерами, например, являются:

– акцентные частицы, которые зачастую сигнализируют о возможном интонационном выделении слов, рядом с которыми они находятся;

- инверсия (отличный от нейтрального порядок слов в предложении);
- противопоставление;
- определенные виды лексики, такие как оценочная и экспрессивная лексика, интенсивы адвербиального типа («очень», «весьма»), кванторные слова («все», «некоторые»), («иногда», «обычно») и прочие.

Для классификации использовались признаки, формализующие лингвистические маркеры интонационного выделения. Признаки можно условно разделить на три категории: синтаксические, грамматические и лексические.

1. Синтаксические признаки. Основным синтаксическим показателем интонационного выделения является порядок слов в предложении, отличный от нейтрального. Формализация данного признака основывается на следующем предположении: поскольку конструкции с нейтральным порядком слов встречаются чаще, их вероятность будет значительно выше вероятности конструкций с инвертированным порядком слов. Для каждого слова с конкретным типом синтаксической зависимости вероятность находится справа или слева от хозяина, то есть слово, от которого оно зависит, будет вычисляться следующим образом:

$$P_{right} = \frac{\sum_{i=1}^k \min(\max(I_{w_i} - I_{h_i}, 0), 1)}{k},$$

$$P_{left} = \frac{\sum_{i=1}^k \min(\max(I_{h_i} - I_{w_i}, 0), 1)}{k},$$

где  $P_{right}$  — вероятность того, что слово с данным типом зависимости находится справа от хозяина;  $P_{left}$  — вероятность того, что слово с данным типом зависимости находится слева от хозяина;  $k$  — общее количество слов с данным типом зависимости;  $I_{w_i}$  — номер позиции текущего слова в предложении;  $I_{h_i}$  — номер позиции слова, от которого зависит текущее слово. Для главного слова в предложении данный вероятностный признак всегда признавался равным единице. Для всех остальных слов предложения в качестве вероятностного

признака указывалось либо значение  $P_{right}$ , если слово находилось справа от слова-хозяина, либо  $P_{left}$ , если слово находилось слева от слова-хозяина. Пример использования данного признака приведен на рисунке 1.

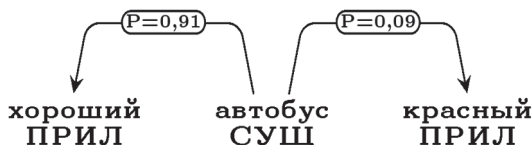


Рис. 1. Использование вероятностного синтаксического признака

Так как рассчитанная вероятность того, что слово-определение находится слева от слова-хозяина, равна 0,91, для прилагательного «хороший» в данном предложении значение синтаксического признака будет равно 0,91. Вероятность того, что слово-определение находится справа от слова-хозяина, равная 0,09, будет указана для прилагательного «красный». Вероятность конструкции с нейтральным порядком слов (определение предшествует главному слову), как и предполагалось, выше, чем вероятность конструкции с инверсией (определение следует за главным словом), при этом меньшая вероятность соответствует тому слову, на котором в данном предложении делается наибольший акцент («красный» выделено сильнее, чем «хороший»).

Синтаксический разбор текстов осуществлялся с помощью парсера ParseySaurus, основанного на системе SyntaxNet, использующей нейронную сеть реализации библиотеки TensorFlow для глубокого обучения [16, 17]. В исследовании применялась синтаксическая модель русского языка из пакета SyntaxNet, которая обучена на синтаксически размеченном подкорпусе Russian-SynTagRus [18], входящем в корпус Universal Dependencies [19].

2. Грамматические признаки. К грамматическим признакам относятся части речи текущего, предыдущего и последующего слов. Они необходимы для поиска наречий, числительных, имен прилагательных, несущих на себе эфатическое ударение, которое зачастую не маркировано ни инверсией, ни принадлежностью слова к одному из особых классов, притягивающих интонационное выделение. Часть речи определялась в процессе работы синтаксического анализатора ParseySaurus, описанного выше.

3. Лексические признаки. В качестве классификационных признаков использовалось само слово, предыдущее и последующее.

Каждое из слов было приведено к нормальной форме с помощью морфологического анализатора Руморфру2 [20].

Также использовались признаки, определявшие принадлежность текущего слова какому-либо из следующих классов:

- акцентные частицы («даже», «же», «только»),
- интенсивы («очень», «невероятно»),
- итеративы («вновь», «всегда»),
- слова, связанные с отрицанием («ни», «нет», «никогда»),
- кванторные слова («каждый», «любой»),
- наречия меры и степени («вполне»),
- вопросительные слова («зачем»),
- наиболее частотная оценочная лексика («отвратительный»),
- наречия, связанные с обозначением времени («срочно», «немедленно», «теперь»).

Классы слов были составлены предварительно авторами исследования на основе работ Т. М. Николаевой [11].

Для каждого класса была высчитана точность, с которой он позволяет определить интонационную выделенность:

$$Pr = \frac{N_{prom}}{N_{prom} + N_{nonprom}},$$

где  $N_{prom}$  — количество выделенных слов в корпусе, входящих в данный класс;  $N_{nonprom}$  — количество невыделенных слов в корпусе, входящих в данный класс. Значения точности для описанных классов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения точности для лексических классов, использованных в качестве признаков

Название класса	Точность
Отрицание	0,42
Кванторные слова	0,42
Акцентные частицы	0,45
Наречия меры и степени	0,57
Итеративы	0,57
Оценочная лексика	0,58
Интенсивы	0,60
Обозначение времени	0,61
Вопросительные слова	0,65

Полученная для каждого класса точность применялась в качестве маркера класса. Значение признака для слов, не принадлежащих к какому-либо из перечисленных классов, приравнивалось к нулю. Значения признака лежат в диапазоне от 0 до 1. В качестве признаков для каждого слова указывались маркеры лексических классов самого слова, предыдущего и последующего слов, а также синтаксического хозяина и зависимого слова. Если зависимых слов было несколько, то учитывался класс с наибольшим значением лексического признака.

**3. Классификаторы.** Тестовая и обучающая выборки представлялись в виде последовательности слов, для каждого из которых были указаны значения выбранных признаков. В результате классификации необходимо было отнести слово к одному из классов: (1) интонационно выделенное слово, (2) интонационно не выделенное слово. Было проведено несколько экспериментов с целью апробации и сравнения классификационных методов, предполагающих разные степени зависимостей слов и их признаков между собой:

– метода, предполагающего независимость объектов и независимость признаков объектов — наивного байесовского классификатора,

– метода, предполагающего независимость объектов и зависимость признаков объектов друг от друга — метода максимальной энтропии,

– метода, предполагающего зависимость объектов и признаков объектов друг от друга — условных случайных полей.

1. Наивный байесовский классификатор (НБК). Наивный байесовский классификатор — это алгоритм классификации, основанный на теореме Байеса и подразумевающий независимость признаков [21]. Данный классификатор рассматривает слова в высказывании как независимые друг от друга и не учитывает их последовательность. Класс  $c$  слова  $w$  вычисляется по формуле:

$$c = \arg \max_{c \in C} P(c) \prod_i P(o_i | c),$$

где  $c$  — это класс слова  $w$  среди множества всех классов  $C$ , а  $o_i$  — это признаки слова  $w$ .

Наивный байесовский классификатор был реализован при помощи библиотеки Natural Language Toolkit (NLTK) для Python [22].

2. Метод максимальной энтропии (ММЭ). Метод максимальной энтропии — это дискриминативный метод классификации, который в

отличие от Наивного байесовского классификатора не предполагает независимости признаков [23]. Это свойство очень важно для обработки лингвистических данных. Например, лексический класс слова в некоторой мере связан его частью речи (см. «наречия, связанные с обозначением времени»).

Данный классификатор из всех возможных классов  $C$  слова  $w$  выбирает класс с наибольшей энтропией, определяемой как:

$$P(c | w) = \frac{1}{Z(w)} \exp\left(\sum_i \lambda_i f_i(w, c)\right),$$

где  $f_i(w, c)$  — классификационный признак,  $\lambda_i$  — вес классификационного признака,  $Z(w)$  — коэффициент нормализации, вычисляемый следующим образом:

$$Z(w) = \sum_c \exp\left(\sum_i \lambda_i f_i(w, c)\right).$$

Метод максимальной энтропии применялся в качестве классификатора, который учитывает возможную зависимость признаков слова друг с другом, но при этом считает слова в высказывании набором независимых объектов.

Метод максимальной энтропии был реализован при помощи библиотеки Natural Language Toolkit (NLTK) для Python [22].

3. Метод условных случайных полей (УСП). Метод условных случайных полей — это дискриминативный метод классификации, получивший широкое применение в задачах по разметке и сегментации текстов [24]. Данный метод схож с методом максимальной энтропии, однако в отличие от него позволяет учитывать окружающий контекст.

Вероятность  $P(c | w)$  того, что слово  $w$  принадлежит к классу  $c$ , вычисляется следующим образом:

$$P(c | w) = \frac{1}{Z(w)} \exp\left(\sum_i \lambda_i f_i(c_i, c_{i-1}, w_i)\right),$$

где  $c$  — класс-гипотеза,  $w$  — классифицируемое слово, — классификационный признак,  $\lambda_i$  — вес классификационного

признака,  $Z(w)$  — коэффициент нормализации, вычисляемый следующим образом:

$$Z(w) = \sum_c \exp\left(\sum_i \lambda_i f_i(c_i, c_{i-1}, w_i)\right).$$

Преимуществом метода считается отсутствие требования к независимости наблюдаемых объектов, что позволяет учитывать контекст классифицируемого объекта. Это особенно важно при поиске в тексте интонационного выделения слов, зачастую обусловленного не столько характеристиками самого выделенного слова, сколько характеристиками его окружения.

Для построения классификатора, опирающегося на метод УСП, использовалось программное обеспечение CRF++ [25].

**4. Экспериментальный материал.** В качестве экспериментального материала были использованы данные речевого корпуса CORPRES [26], созданного на кафедре фонетики и методики преподавания иностранных языков Санкт-Петербургского государственного университета. Корпус содержит около 30 часов чтения текстов профессиональными дикторами и фонетическую, орфографическую и интонационную разметку, включающую сведения об интонационно выделенных словах. Для данного исследования из корпуса были взяты тексты двух художественных повестей, прочитанных восьмью дикторами, где для каждого слова было указано количество выделивших его дикторов. Объем двух текстов составляет 34,000 словоупотреблений, из которых 3854 были интонационно выделены хотя бы одним диктором. Корпус содержит 3800 предложений, 2233 из них содержали хотя бы одно интонационно выделенное слово. В таблице 2 указано, какое количество слов было выделено во время прочтения одним, двумя, тремя и так далее дикторами. Третий столбец таблицы («Доля от всех выделенных слов») показывает, какую часть от общей массы интонационно выделенных слов корпуса составляют слова, выделенные одним, двумя и так далее дикторами.

Таблица 2. Количество интонационно выделенных слов в корпусе

Количество дикторов	Количество слов	Доля от всех выделенных слов, %
1	2222	57
2	805	21
3	420	11
4	206	5
5	102	3
6	62	2
7	32	0,9
8	5	0,1
ИТОГО	3584	100



Из таблицы видно, что в текстах преобладают выделения, реализованные только одним диктором, и практически отсутствуют случаи, когда слово выделили сразу все восемь дикторов. Это является следствием того, что исследуемое явление характеризуется большой вариативностью и зависимостью от интерпретации текста конкретным диктором.

**5. Обсуждение полученных результатов.** Использование такой метрики, как правильность (accuracy) при оценке качества предложенного метода нецелесообразно вследствие сильного дисбаланса между классами интонационно выделенных и нейтральных слов: первых в несколько раз меньше, чем вторых. Поэтому для оценки качества применялись следующие метрики: полнота (recall), точность (precision) и F1-мера:

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$Re = \frac{TP}{TP + FN},$$

$$F_1 = 2 * \frac{Pr * Re}{Pr + Re},$$

где  $TP$  — истинно-положительное решение,  $TN$  — истинно-отрицательное решение,  $FP$  — ложно-положительное решение,  $FN$  — ложно-отрицательное решение.

В ходе исследования было проведено три эксперимента: определение слов, интонационно выделяемых большинством говорящих; определение выделенных слов в материале, включающем предложения без выделенных слов; определение слов, интонационно выделяемых любым количеством говорящих.

*Эксперимент 1:* определение слов, интонационно выделяемых большинством говорящих.

В первом эксперименте выборки для обучения и тестирования составлялись из предложений корпуса, каждое из которых содержало хотя бы одно слово, выделенное как минимум половиной дикторов, то есть четырмя (384 предложения). Выборка для обучения содержала 75% данного подкорпуса (288 предложений), тестовая выборка — оставшиеся 96 предложений. Из-за малого объема доступного материала для апробации классификационных методов использовалась кроссвалидация, при которой весь материал был

разделен на 4 части. В таблице 3 приведены результаты эксперимента, которые были получены с применением наилучших наборов признаков, определенных эмпирически, которые в свою очередь приведены в таблице 4. В качестве базового уровня эффективности в таблице приводятся результаты классификации при помощи модели «мешок слов» (то есть с использованием только лексем в качестве признаков), реализованной на основе метода максимальной энтропии (полученное с помощью данного метода значение  $F_1$ -меры для базового уровня было наивысшим).

Таблица 3. Результаты первого эксперимента

	Базовый уровень	Наивный байесовский классификатор	Метод максимальной энтропии	Условные случайные поля
Полнота	0,22	0,65	0,38	0,39
Точность	0,53	0,43	0,52	0,59
$F_1$ -мера	0,31	0,52	0,44	0,47

Из таблицы 3 видно, что для всех трех методов классификации значение средневзвешенной метрики  $F_1$  выше, чем для базового уровня, что демонстрирует необходимость и полезность применения других признаков помимо лексем. Также можно наблюдать, что для более сложных дискриминативных моделей значения  $F_1$ -меры ниже, чем для генеративной, что, скорее всего, связано с малым количеством материала: в связи с тем, что при любом наполнении обучающей выборки интонационно выделенные слова являются крайне редко встречающимся классом, его вероятность во всех используемых моделях была весьма мала; это привело к получению низких значений полноты при классификации с помощью методов, не делающих предположения о независимости признаков (методы максимальной энтропии и условных случайных полей). В целом значения метрик для двух этих методов довольно близки, что можно объяснить родственностью методов. Однако при данной постановке эксперимента условные случайные поля позволяют получить небольшой прирост по точности и полноте классификации по сравнению с методом максимальной энтропии (0,07 и 0,01 соответственно).

С другой стороны, в результатах, полученных с помощью наивного байесовского классификатора, как и ожидалось, наблюдается больший уклон в сторону полноты. Благодаря этому качеству генеративной модели ее выгодно использовать в задачах выделения иного плана, например, при поиске интонационных выделений в речевом сигнале: наивный байесовский метод можно эффективно использовать для определения как можно большего числа

потенциальных выделенных единиц в целях их последующего «отсеивания» с помощью признаков другого типа (акустических).

Относительно низкие значения метрик можно объяснить крайней вариативностью интонационного выделения, зависимостью от конкретного диктора и текста; также значение точности несколько занижено вследствие того, что во время тестирования интонационно выделенными считались только слова, на которых акцент был сделан как минимум четырьмя дикторами. В случае, если выделенная одним-тремя дикторами единица была классифицирована как выделенная, это считалось ошибкой первого рода (ложное срабатывание).

Также определенную проблему представляет отсутствие признаков, полученных с помощью более глубокого семантического анализа, что является следствием ограниченности семантических ресурсов для русского языка. Большое количество экспрессивной и оценочной лексики не попало в составленные вручную списки лексических классов, что привело к большому количеству ошибок второго рода (ложноотрицательное срабатывание) и, соответственно, снижению полноты. На качество признаков, связанных с синтаксическими отношениями, сильно повлияло качество синтаксического парсера.

В таблице 4 указаны классификационные признаки в порядке убывания эффективности для каждого метода. В каждом столбце выше черты располагаются признаки, попавшие в итоговый набор, дающий наилучшие результаты (первые три типа признаков для наивного байесовского классификатора, первые шесть — для методов максимальной энтропии и условных случайных полей).

Таблица 4. Эффективность классификационных признаков

Наивный байесовский классификатор	Метод максимальной энтропии	Условные случайные поля
Части речи Слово Лекс. класс слова	Слово Соседние слова Части речи	Слово Соседние слова Части речи
Лекс. классы соседних слов Соседние слова	Лекс. классы соседних слов Лекс. класс слова	Лекс. класс слова Лекс. классы соседних слов
Синтаксические признаки Лекс. классы главного и зависимых слов	Синтаксические признаки Лекс. классы главного и зависимых слов	Синтаксические признаки Лекс. классы главного и зависимых слов

Наиболее результативными оказались лексические и грамматические признаки. Эффективность самого классифицируемого слова и соседних с ним как признаков можно объяснить наличием определенного небольшого количества лексических единиц, которые часто выделяются конкретными дикторами (например частица «тоже», встретившаяся в выборках 21 раз, была выделена 20 раз). Лексические классы обобщают группы таких единиц; вероятно, отдельные слова как признаки станут менее эффективными по сравнению с лексическими классами при тестировании на более объемном и разнородном корпусе, включающем в себя предложения из текстов большего количества жанров. Части речи позволяют находить оценочные прилагательные и наречия, не попавшие в список лексических классов. Лексические классы главного и зависимых слов показали низкую результативность, скорее всего, вследствие того, что в большинстве случаев их функцию выполняют признаки классов соседних слов; действительно, слова, связанные синтаксическими отношениями, оказывают наибольшее влияние на выделенность друг друга в том случае, если они находятся по соседству (например, частицы, непосредственно следующие за главными словами или предшествующие им, акцентируют их). Достаточно часто встречаются ситуации, когда главное и зависимое слова находятся в разных концах предложения (например, главное слово придаточного предложения считается зависимым от главного слова главного предложения); тогда с точки зрения интонационной выделенности они никак не взаимосвязаны.

В целом все три метода показывают наилучшие результаты при определении интонационной выделенности на словах из определенных описанных выше лексических групп, а также на словах, связанных синтаксическими отношениями с акцентными частицами. Наибольшее количество ошибок второго рода связано с пропуском интонационно выделенных противопоставлений и оценочных слов. Другим источником ошибок является смешение классификационными методами (в частности, УСП) акцентирующих и акцентируемых слов (первые притягивают выделенность на соседние слова, вторые сами являются объектами выделения), что особенно часто случается в предложениях с указательными частицами и неопределенными местоимениями (например, в предложении «Это я говорил с вами», где дикторами было выделено слово «я», при классификации как выделенная была определена частица «это»).

*Эксперимент 2:* включение в тестовый материал предложений без интонационно выделенных слов.

Во втором эксперименте тестовый материал был организован таким образом, чтобы он был максимально приближен к реальному

тексту по количеству в нем интонационно выделенных единиц. Тестовая выборка содержала 25% подкорпуса, использовавшегося в первом эксперименте (94 предложения), и 94 предложения без интонационно выделенных слов (всего 188 предложений). На 75% подкорпуса, использовавшегося в первом эксперименте (290 предложений), проводилось обучение модели. Метрики качества для данного эксперимента указаны в таблице 5. Как в таблице 3, в качестве базового уровня приводятся результаты классификации при помощи модели «мешок слов», реализованной на основе метода максимальной энтропии.

Таблица 5. Результаты второго эксперимента

	Базовый уровень	Наивный байесовский классификатор	Метод максимальной энтропии	Условные случайные поля
Полнота	0,24	0,66	0,42	0,39
Точность	0,32	0,27	0,41	0,40
F <sub>1</sub> -мера	0,27	0,39	0,41	0,39

Как можно видеть из таблицы, такая постановка эксперимента сильнее всего сказывается на результатах наивного байесовского классификатора, снижая значение F<sub>1</sub>-меры на 0,13. В итоге наиболее сбалансированные метрики и наибольшее значение F<sub>1</sub>-меры наблюдается при использовании метода максимальной энтропии.

*Эксперимент 3:* определение слов, интонационно выделяемых любым из говорящих.

Целью третьего эксперимента было установить точность автоматического определения слов, которые были выделены читателями хотя бы единожды. При этом было сохранено высокое качество обучающего материала, то есть в обучающих выборках по-прежнему использовались предложения, содержащие слова, выделенные хотя бы четырьмя дикторами (384 предложения). Выборка для тестирования состояла из предложений, содержащих как минимум одно слово, выделенное одним, двумя или тремя дикторами (1767 предложений). В таблице 6 приведены данные о количестве интонационно выделенных слов в тестовой выборке в зависимости от количества дикторов, реализовавших выделение.

Таблица 6. Количество интонационно выделенных слов в тестовой выборке

Количество дикторов, выделивших слово	Количество слов	Доля от общ. кол-ва слов в выборке, %
1	1748	12,8
2	647	4,7
3	347	2,5

Для всех слов из тестовой выборки были получены вероятностные оценки каждого из двух возможных классов (оценка максимального правдоподобия для классификатора максимальной энтропии; граничная вероятность для условных случайных полей; вероятностная оценка, восстановленная из логарифмической оценки для байесовского классификатора). На основе этих оценок в каждом предложении было выбрано одно слово, для которого вероятность принадлежности к классу выделенных слов была наибольшей.

В таблице 7 указаны результаты третьего эксперимента. Предложением с правильно определенным интонационно выделенным словом считалось предложение, в котором слово с наибольшей вероятностью принадлежности к классу выделенных слов действительно было интонационно выделено хотя бы одним диктором. В качестве базового уровня эффективности была взята вероятность правильного определения выделенного слова случайным образом (относительное количество интонационно выделенных слов в предложении). (Значение базового уровня рассчитывалось отдельно для каждого предложения; в таблице указано среднее для всех предложений значение. В связи с тем, что распределение предложений по длинам ненормально и мультимодально, указанные базовые уровни не совпадают со значениями, получаемыми как отношение количества выделенных слов в предложениях и средней длины предложений — базовые уровни во всех случаях выше).

В последнем столбце таблицы приводятся результаты, полученные при помощи объединения вероятностных оценок всех трех классификаторов: в качестве интонационно выделенного слова выбиралось слово с наибольшим средним значением вероятностной оценки.

Таблица 7. Зависимость точности классификации в зависимости от длины предложения и количества интонационно выделенных слов

Кол-во выделенных слов в предложении	Кол-во предл.	Длина предл.	Базовый уровень	Доля предложений с правильно определенным выделенным словом			Объед. оценка
				НБК	ММЭ	УСП	
1	1094	8 ± 5	0,22	0,50	0,50	0,52	0,52
2	470	11 ± 6	0,30	0,59	0,57	0,6	0,6
3	133	14 ± 6	0,33	0,72	0,66	0,6	0,70
4	52	18 ± 6	0,32	0,65	0,67	0,65	0,65
5	17	18 ± 5	0,36	0,88	0,76	0,74	0,82
Средняя точность			0,30	0,67	0,63	0,62	0,66

Во-первых, стоит отметить тот факт, что с увеличением длины предложения растет вариативность его интерпретации говорящим, что подтверждается корреляцией между длиной предложения и количеством слов, интонационно выделенных хотя бы одним из прочитавших его. При этом процент таких слов в предложении практически не изменяется и колеблется около 33 % (см. столбец «Базовый уровень»), в то время как точность классификации растет с числом интонационно выделенных слов в предложении и в среднем на 34% точнее.

Объединение вероятностных оценок позволяет получить сбалансированные результаты: в четырех случаях из пяти полученное значение точности больше, чем среднее арифметическое значений точности отдельных классификаторов. Другими словами, при объединении оценок, как правило, удается достигать точности, которая либо равна лучшей из возможных при классификации одним методом, либо приближена к ней. Это выгодно, поскольку не наблюдается полного превосходства какого-либо одного метода над другими (для предложений с одним или двумя выделенными словами лучшие результаты показывают условные случайные поля, для предложений с тремя или пятью — наивный байесовский классификатор, для предложений с четырьмя — метод максимальной энтропии).

В таблице 8 приводятся данные о корреляции между количеством выделивших слово дикторов и эффективностью его автоматического определения. Доля, указанная во втором столбце, считалась как отношение количества слов, выделенных  $N$  дикторами и классифицированных как выделенные, к общему количеству слов, выделенных  $N$  дикторами. Ожидаемо, для каждого классификационного метода доля тем выше, чем больше  $N$ . Это можно считать положительным результатом вследствие предположения о том, что слово считается тем более подходящим для интонационного выделения, чем большее количество дикторов выделили его при прочтении (акцент, реализованный одним диктором, может быть ошибкой или следствием специфической дикторской интерпретации текста, в отличие от акцента, реализованного тремя людьми).

Таблица 8. Корреляция между количеством выделивших слово дикторов и эффективностью его автоматического определения

Количество дикторов	Доля правильно классифицированных слов		
	Наивный байесовский классификатор	Метод максимальной энтропии	Условные случайные поля
1	0,30	0,30	0,31
2	0,41	0,39	0,40
3	0,55	0,51	0,55

В таблице 9 сравниваются результаты, представленные в данной статье, и результаты других исследователей, работавших над схожей задачей, то есть над определением выделенных слов предложения с помощью текстовых признаков. Условия и конкретные цели экспериментов, проводившихся в этих исследованиях, значительно отличаются друг от друга, поэтому для обеспечения наиболее корректного сравнения результаты данного исследования приводятся трижды, при этом указываются значения метрик, полученных в ходе экспериментов, наиболее близких по условиям к тем, что были представлены в других работах.

Таблица 9. Сравнение результатов с существующими системами

Исследование	Язык	Объем корпуса	Правильность (Accuracy)	F1-мера	Точность (Precision)	Полнота
Nakajima et al. [3]	япон.	5737 слов	–	67%	70,6%	64,2%
Эксперимент 1	рус.	5745 слов	–	52%	43%	65%
Brenier et al. [2]	англ.	2906 слов		31%	42,4%	25,6%
Эксперимент 2	рус.	5745 слов		41%	41%	42%
Novy et al. [4]	англ.	1000 предл.	44%	–		
Эксперимент 3	рус.	2151 предл.	67%	–		

В исследовании [2] обучение и тестирование модели проводилось на полном объеме доступного корпуса, 20% слов в котором были интонационно выделены; при этом выборки включали предложения без интонационно выделенных слов. В связи с этим результаты [2] сравниваются с результатами второго эксперимента, проведенного в данной статье.

Организация корпуса, применявшегося в [3], была такова, что около 70% предложений содержали более двух выделенных единиц, и около 5% не содержали ни одного, вследствие чего метод, описываемый в [3], был ориентирован на предсказание нескольких выделенных единиц в предложении; поэтому в таблице 8 приводится сравнение метрик качества для этого метода и метрик, приведенных в данной статье в описании первого эксперимента, где отсутствовали предложения без интонационно выделенных слов.

В [4] предсказание интонационно выделенных слов (т.е. наиболее важных в предложении и пригодных для интонационного



выделения) производилось способом, схожим с тем, что применялся в данном исследовании в третьем эксперименте: из всех слов предложения в качестве выделенного выбиралось одно, имеющее наибольшую вероятность оказаться в классе маркированных слов; вероятность оценивалась с помощью классификационного метода. Показателем точности считался процент предложений, где интонационно выделенное слово было определено верно.

В двух случаях из трех полученные в данном исследовании результаты выше аналогов. Вероятно, разница в полученных результатах связана не только с различиями в подходах, наборах признаков и классификационных методах, но и с особенностями исследуемых языков и объемами корпусов, на которых проводились исследования.

**6. Заключение.** Как показало проведенное исследование, несмотря на крайнюю вариативность и зависимость интонационной выделенности от конкретного диктора и его интерпретации художественного текста, автоматическое предсказание выделенных слов возможно осуществить с использованием только данных, извлекаемых из текста (грамматических, лексических и синтаксических признаков), с достаточной степенью эффективности. Результаты сопоставимы с результатами, полученными другими исследователями при решении той же задачи для других языков, и в двух случаях из трех превосходят их.

Сравнительный анализ методов классификации позволяет сделать вывод о том, что оптимальный метод следует выбирать, исходя из задач исследования. В частности, наивный байесовский классификатор, демонстрирующий наибольшие значения полноты, может быть использован при наличии второго этапа классификации, на котором будут отбрасываться лишние единицы, отнесенные к классу выделенных слов (например, это можно осуществить с помощью акустических признаков при определении интонационно выделенных слов в речи). Методы условных случайных полей и максимальной энтропии позволяют получить более сбалансированные и примерно равные значения метрик, что позволяет говорить о взаимозаменяемости методов при решении данной задачи.

## Литература

1. *Strom V. et al. Modelling Prominence and Emphasis Improves Unit-Selection Synthesis // Proceedings of Interspeech 2008. 2008.*
2. *Brenier J., Cer D., Jurafsky D. The detection of emphatic words using acoustic and lexical features // Ninth European Conference on Speech Communication and Technology (ICSLP'2005). 2005.*

3. *Nakajima H., Mizuno H., Sakauchi S.* Emphasized Accent Phrase Prediction from Text for Advertisement Text-To-Speech Synthesis // 28th Pacific Asia Conference on Language, Information and Computation (PACLIC'2014). 2014. pp. 170–177.
4. *Hovy D. et al.* Analysis and Modeling of “Focus” in Context // Proceedings of Interspeech 2013. 2013. pp. 402–406.
5. *Mishra T., Sridhar V.K.R., Conkie A.* Word Prominence Detection using Robust yet Simple Prosodic Features // Proceedings of Interspeech 2012. 2012.
6. *Cernak M., Honnet P.E.* An empirical model of emphatic word detection // Proceedings of Interspeech 2015. 2015. pp. 573–577.
7. *Tamburini F.* Automatic detection of prosodic prominence by means of acoustic analyses // *Lingue e linguaggio*. 2015. vol. 14. no. 1. pp. 131–148.
8. *Johnson D.O., Kang O.* Automatic prominent syllable detection with machine learning classifiers // *International Journal of Speech Technology*. 2015. vol. 18. no. 4. pp. 583–592.
9. *Suni A., Aalto D., Vainio M.* Hierarchical representation of prosody for statistical speech synthesis // *Computer Speech and Language Journal*. 2017. vol. 45. pp. 123–136.
10. *Heckmann M.* Audio-visual word prominence detection from clean and noisy speech // *Computer Speech & Language*. 2018. vol. 48. pp. 15–30.
11. *Николаева Т.М.* Семантика акцентного выделения // М.: Наука. 1982. 106 с.
12. *Кодзасов С.В.* Законы фразовой акцентуации // *Просодический строй русской речи*. М.: Институт русского языка РАН. 1996. С. 181–206.
13. *Ковтунова И.И.* Современный русский язык. Порядок слов и актуальное членение предложения // М.: Едиториал УРСС. 2002. 240 с.
14. *Слюсарь Н.А.* На стыке теорий. Грамматика и информационная структура в русском и других языках // *Либроком*. 2009. 416 с.
15. *Luchkina T., Ionin T.* The effect of prosody on availability of inverse scope in Russian // *Formal Approaches to Slavic Linguistics*. 2015. vol. 23. pp. 418–437.
16. *Andor D. et al.* Globally normalized transition-based neural networks // Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2016. vol. 1. pp. 2442–2452.
17. *Alberti C. et al.* SyntaxNet Models for the CoNLL 2017 Shared Task // arXiv preprint arXiv: 1703.04929. 2017.
18. *Nivre J., Boguslavsky L., Iomdin L.* Parsing the SynTagRus Treebank of Russian // Proceedings of the 22nd International Conference on Computational Linguistics (CoLING'2008). 2008. vol. 2. pp. 641–648.
19. *Nivre J. et al.* Universal Dependencies v1: A multilingual treebank collection // Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'2016). 2016.
20. *Korobov M.* Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages // International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST'2015). 2015. pp. 320–332.
21. *McCallum A., Nigam K.* A comparison of event models for Naive Bayes text classification // Proceedings of AAAI/ICML Workshop on Learning for Text Categorization. 1998. pp. 41–48.
22. *Bird S., Klein E., Loper E.* Natural Language Processing with Python // O'Reilly Media, Inc. 2009. 504 p.
23. *Berger A., Pietra V., Pietra S.* A Maximum Entropy Approach to Natural Language Processing // *Computational Linguistics*. 1996. vol. 22. no. 1. pp. 39–71.
24. *Collobert R. et al.* Natural language processing (almost) from scratch // *Journal of Machine Learning Research*. 2011. vol. 12. no. Aug. pp. 2493–2537.

25. *Kudo T.* CRF++: Yet Another CRF Toolkit. 2013. URL: <https://taku910.github.io/crfpp> (дата обращения: 15.09.2017).
26. *Skrelin P. et al.* CORPRES - Corpus of Russian Professionally Read Speech // 13th International Conference Text, Speech and Dialogue (TSD'2010). 2010. pp. 392–399.

**Кочаров Даниил Александрович** — к-т филол. наук, доцент кафедры фонетики и методики преподавания иностранных языков, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: автоматическая обработка речи и текста, математическая лингвистика, речевые технологии, фонетика, фонология. Число научных публикаций — 42. [kocharov@phonetics.spb.ru](mailto:kocharov@phonetics.spb.ru); Университетская наб., 11, Санкт-Петербург, 199034; р.т.: +78123289565.

**Меньшикова Алла Павловна** — лаборант-исследователь филологического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), студент кафедры математической лингвистики, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: математическая лингвистика, речевые технологии. Число научных публикаций — 1. [menshikova.alla2016@yandex.ru](mailto:menshikova.alla2016@yandex.ru); Университетская наб., 11, Санкт-Петербург, 199034; р.т.: +79217638387.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена в рамках проекта «Фонетические аспекты синтеза речевого сигнала высокого уровня естественности», финансируемого из средств Санкт-Петербургского государственного университета (№31.37.353.2015).

D.A. KOCHAROV, A.P. MENSHIKOVA  
**DETECTION OF PROMINENT WORDS IN RUSSIAN TEXTS  
 USING LINGUISTIC FEATURES**

---

*D.A. Kocharov, A.P. Menshikova. Detection of Prominent Words in Russian Texts Using Linguistic Features.*

**Abstract.** The article presents a method of detecting prosodically prominent words, i.e. words that carry most of the information in the utterance. The method relies on lexical, grammatical and syntactic markers of prominence, and can be used in Text-to-Speech synthesis systems to make synthesized speech sound more natural.

Three different classification methods were used: Naive Bayes, Maximum Entropy and Conditional Random Fields models. The results of the experiments show that discriminative models provide more balanced values of the performance metrics, while the generative model is potentially more useful for detecting prominent words in speech signal.

The results of the study are comparable with the performances of similar systems developed for other languages, and in some cases surpass them.

**Keywords:** prosodic prominence, emphasis, prosody, lexical analysis, syntax analysis, Naive Bayes classifier, Maximum Entropy classifier, Conditional Random Fields, Russian language.

---

**Kocharov Daniil Alexandrovich** — Ph.D., associate professor of phonetics and methods of teaching foreign languages department, Saint Petersburg State University (SPbSU). Research interests: automatic speech and text processing, computational linguistics, speech technologies, phonetics, phonology. The number of publications — 42. [kocharov@phonetics.pu.ru](mailto:kocharov@phonetics.pu.ru); 11, Universitetskaya Emb., Saint-Petersburg, 199034; office phone: +78123289565.

**Menshikova Alla Pavlovna** — research assistant of the philology faculty, Saint Petersburg State University (SPbSU), student of mathematical linguistics department, Saint Petersburg State University (SPbSU). Research interests: computational linguistics, speech technologies. The number of publications — 1. [menshikova.alla2016@yandex.ru](mailto:menshikova.alla2016@yandex.ru); 11, Universitetskaya emb., Saint Petersburg, 199034, Russia; office phone: +79217638387.

**Acknowledgements.** The research was supported by SPbSU (project # 31.37.353.2015).

### References

1. Strom V. et al. Modelling Prominence and Emphasis Improves Unit-Selection Synthesis. Proceedings of Interspeech 2008. 2008.
2. Brenier J., Cer D., Jurafsky D. The detection of emphatic words using acoustic and lexical features. Ninth European Conference on Speech Communication and Technology (ICSLP'2005). 2005.
3. Nakajima H., Mizuno H., Sakauchi S. Emphasized Accent Phrase Prediction from Text for Advertisement Text-To-Speech Synthesis. 28th Pacific Asia Conference on Language, Information and Computation (PACLIC'2014). 2014. pp. 170–177.
4. Hovy D. et al. Analysis and Modeling of “Focus” in Context. Proceedings of Interspeech 2013. 2013. pp. 402–406.
5. Mishra T., Sridhar V.K.R., Conkie A. Word Prominence Detection using Robust yet Simple Prosodic Features. Proceedings of Interspeech 2012. 2012.

6. Cernak M., Honnet P.E. An empirical model of emphatic word detection. Proceedings of Interspeech 2015. 2015. pp. 573–577.
7. Tamburini F. Automatic detection of prosodic prominence by means of acoustic analyses. *Lingue e linguaggio*. 2015. vol. 14. no. 1. pp. 131–148.
8. Johnson D.O., Kang O. Automatic prominent syllable detection with machine learning classifiers. *International Journal of Speech Technology*. 2015. vol. 18. no. 4. pp. 583–592.
9. Suni A., Aalto D., Vainio M. Hierarchical representation of prosody for statistical speech synthesis. *Computer Speech and Language Journal*. 2017. vol. 45. pp. 123–136.
10. Heckmann M. Audio-visual word prominence detection from clean and noisy speech. *Computer Speech & Language*. 2018. vol. 48. pp. 15–30.
11. Nikolaeva T.M. *Semantika akcentnogo vydelenija* [The semantics of the accentual prominence]. M.: Nauka. 1982. 106 p. (In Russ.).
12. Kodzasov S.V. [The laws of phrasal accentuation]. *Prosodicheskij stroj russkoj rechi* [Prosodic structure of Russian speech]. M.: Institut russkogo jazyka RAN. 1996. pp. 181–206. (In Russ.).
13. Kovtunova I.I. *Sovremennyj russkij jazyk. Porjadok slov i aktual'noe chlenenie predlozhenija* [Modern Russian: word order and the communicative structure of a sentence]. M.: Editorial URSS. 2002. 240 p. (In Russ.).
14. Slijusar' N.A. *At the junction of theories. The grammar and the informational structure in Russian and other languages* [Na styke teorij. Grammatika i informacionnaja struktura v russkom i drugih jazykah]. Librokom. 2009. 416 p. (In Russ.).
15. Luchkina T., Ionin T. The effect of prosody on availability of inverse scope in Russian. *Formal Approaches to Slavic Linguistics*. 2015. vol. 23. pp. 418–437.
16. Andor D. et al. Globally normalized transition-based neural networks. Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2016. vol. 1. pp. 2442–2452.
17. Alberti C. et al. SyntaxNet Models for the CoNLL 2017 Shared Task. arXiv preprint arXiv: 1703.04929. 2017.
18. Nivre J., Boguslavsky I., Iomdin L. Parsing the SynTagRus Treebank of Russian. Proceedings of the 22nd International Conference on Computational Linguistics (CoLING'2008). 2008. vol. 2. pp. 641–648.
19. Nivre J. et al. Universal Dependencies v1: A multilingual treebank collection. Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'2016). 2016.
20. Korobov M. Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages. International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST'2015). 2015. pp. 320–332.
21. McCallum A., Nigam K. A comparison of event models for Naive Bayes text classification. Proceedings of AAAI/ICML Workshop on Learning for Text Categorization. 1998. pp. 41–48.
22. Bird S., Klein E., Loper E. *Natural Language Processing with Python*. O'Reilly Media, Inc. 2009. 504 p.
23. Berger A., Pietra V., Pietra S. A Maximum Entropy Approach to Natural Language Processing. *Computational Linguistics*. 1996. vol. 22. no. 1. pp. 39–71.
24. Collobert R. et al. Natural language processing (almost) from scratch. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. vol. 12. no. Aug. pp. 2493–2537.
25. Kudo T. CRF++: Yet Another CRF Toolkit. 2013. Available at: <https://taku910.github.io/crfpp> (accessed: 15.09.2017).
26. Skrelin P. et al. CORPRES - Corpus of Russian Professionally Read Speech. 13th International Conference Text, Speech and Dialogue (TSD'2010). 2010. pp. 392–399.

Н.А. ЕРМОЛИН, В.В. МАЗАЛОВ, А.А. ПЕЧНИКОВ  
**ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫЕ МЕТОДЫ НАХОЖДЕНИЯ  
СООБЩЕСТВ В АКАДЕМИЧЕСКОМ ВЕБЕ**

---

*Ермолин Н.А., Мазалов В.В., Печников А.А. Теоретико-игровые методы нахождения сообществ в академическом Вебе.*

**Аннотация.** Исследуется задача нахождения сообществ в графе, представляющем собой фрагмент академического Веба, вершинами которого являются сайты научных организаций, а дугами — гиперссылки. Предлагается новый подход, основанный на методах коалиционной теории игр, применение которого приводит к устойчивому коалиционному разбиению. Для этого определяется функция предпочтения для любой пары вершин в графе, и тогда нахождение стабильного разбиения сводится к нахождению максимума потенциальной функции. Описан реализованный алгоритм поиска стабильного разбиения, даны оценки его сложности. Делается сравнение предлагаемого метода с двумя известными методами нахождения сообществ, в том числе эффективность нового метода показывается на разбиении на сообщества фрагмента Веба, состоящего из официальных сайтов Сибирского и Дальневосточного отделений РАН.

**Ключевые слова:** веб-пространство, граф, сообщество, модулярность, коалиционная теория игр.

---

**1. Введение.** Исследования Веба относятся к актуальным разделам такого направления компьютерных наук, как вебометрика [1], в последнее время все чаще называемого «наукой о Вебе» [2]. В России это направление активно развивается в Новосибирске и Санкт-Петербурге и представлено в работах [3-7]. Методы изучения принципов самоорганизации и связей веб-пространств, апробированные на примерах таких крупных организаций, как Сибирское отделение РАН и Санкт-Петербургский университет, могут быть использованы для анализа структурно-коммуникативной организации целого ряда профессиональных веб-сообществ.

Вследствие гигантской размерности Веба во многих случаях исследования проводятся на его достаточно узких фрагментах, таких как множества сайтов университетов Великобритании, научных учреждений России и так далее. Веб-пространство — это множество веб-сайтов, связанных посредством гиперссылок. В данной статье речь будет идти о веб-пространстве официальных сайтов научных организаций России, относящихся к Сибирскому и Дальневосточному отделениям РАН.

Математической моделью, успешно используемой для анализа веб-пространств, является веб-граф [8], в нашем случае построенный следующим образом: множество вершин соответствует сайтам организаций, а множество дуг — гиперссылкам, связывающим эти сайты. Такой граф является ориентированным графом без петель, имеющим кратные дуги.

Неформально под веб-сообществом понимается некоторое подмножество вершин веб-графа, для которого количество дуг, связывающих вершины-участники веб-сообщества, больше, чем количество дуг, связывающих их с другими вершинами [9]. Модулярность, в свою очередь, это свойство графа и некоторого разбиения его на подграфы. Для обозначения подграфов, на которые разбивается граф, используются различные термины, такие как кластер, модуль, сообщество [10, 11]. Применительно к Вебу более распространенным является использование термина «сообщество», и далее мы будем использовать его.

Мера модулярности показывает, насколько данное разбиение качественно в том смысле, что существует много дуг, лежащих внутри сообществ, и мало дуг, лежащих вне сообществ, но соединяющих их между собой.

Определение функции модулярности  $Q$  в терминологии случайных графов выглядит следующим образом [12]:

- пусть  $G(V,E)$  — граф с множеством вершин  $V$  и множеством дуг  $E$ ;
- $A$  — матрица инцидентности графа  $G(V,E)$ ;
- $A_{ij}$  — количество дуг из вершины  $i$  в вершину  $j$ ;
- $m$  — количество дуг в графе,  $m = |E|$ ;
- $Pr(\cdot)$  — вероятность некоторого события;
- $S$  — некоторое множество сообществ, на которые разбит граф  $G(V,E)$ ;
- $s$  — обозначение одного из модулей  $s \in S$ .

Тогда выражение для модулярности примет вид:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{s \in S} \sum_{i, j \in s} [A_{ij} - \Pr(A_{ij} = 1)]. \quad (1)$$

Модулярность часто используется для определения качества разбиения графа на сообщества, однако в данной работе такая задача не является основной.

Далее мы рассмотрим три метода нахождения сообществ, основанные на исследованиях, опубликованных в работах [13-15]; два первых — кратко с отсылкой к литературе, а третий более подробно. Будем называть эти методы по первым буквам фамилий авторов NG, BGLL и АКМ соответственно.

Для методов NG и АКМ в рамках работы были написаны реализующие их программы, а метод BGLL реализован в программном пакете Gephi [16], который и использовался в нашем случае.

Далее, мы сформировали фрагмент веб-пространства научных организаций России, содержащий организации, географически и админи-

стративно принадлежащие к двум разным отделениям РАН, построили для него веб-граф, нашли разбиения полученного веб-графа всеми тремя методами на заданное число сообществ, и сравнили их между собой. В первом случае мы проверили, насколько хорошо разбивается веб-граф на два сообщества в соответствии с известной нам принадлежностью к двум разным отделениям. Во втором случае сравниваются разбиения тремя методами на 5 сообществ, поскольку для метода BGLL именно разбиение на 5 сообществ дает максимальное значение функции модулярности (1).

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о перспективности метода нахождения разбиений графа, основанного на принципиально новой идее коалиционных игр.

**2. Методы NG и BGLL.** Метод NG опишем, следуя [13]. Здесь рассматривается неориентированный граф, который получается из ориентированного графа следующим образом: сначала удаляются кратные дуги, а затем оставшиеся дуги заменяются на ребра.

Основная идея заключается в том, что наибольшей центральностью обычно обладают ребра, соединяющие разные сообщества, поэтому их надо удалять из графа в первую очередь. Для нахождения центральности ребер используется такой показатель центральности, как *betweenness centrality* (в русскоязычных публикациях используется также термин «центральность по посредничеству»). Центральность по посредничеству показывает, сколько кратчайших путей между всеми вершинами графа проходит через определенное ребро. После удаления нескольких ребер значения центральности ребер существенно меняются, поэтому их нужно пересчитывать.

Кратко опишем алгоритм:

1. Находим значения центральности всех ребер.
2. Удаляем ребро с максимальной центральностью.
3. Пересчитываем центральности ребер и переходим к шагу 2.

В какой-то момент прерывая этот процесс, получаем разбиение на сообщества, считая вершины каждой полученной компоненты связности отдельным сообществом.

Поскольку после каждого удаленного ребра проверка, не увеличилось ли число компонент связности в графе, достаточно затратная, можно действовать по-другому, а именно следующим образом:

1. Сформируем список ребер в порядке удаления.
2. Поместим каждую вершину в отдельное сообщество.
3. Пройдем по списку удаленных ребер в обратном порядке, объединяя сообщества, которым принадлежат вершины очередного ребра.

Такая схема позволяет один раз сформировать список удаленных ребер (а это очень затратная процедура из-за необходимости



пересчета центральностей), а потом экспериментировать с количеством сообществ.

Метод BGLL опишем, следуя [14]. Идея алгоритма основана на свойстве самоподобия сложных сетей [17] и естественным образом включает понятие иерархии, так как в процессе его выполнения строится сообщество сообществ.

Каждый проход алгоритма состоит из двух фаз, повторяющихся многократно.

Первый проход начинается с первой фазы, когда генерируется столько же сообществ, сколько вершин в графе, и каждое сообщество содержит по одной вершине.

Затем для каждой вершины  $i$  рассматриваются все вершины  $j$ , смежные с  $i$ , и оценивается прирост модулярности в том случае, если удалить  $i$  из своего сообщества и добавить его в сообщество  $j$ .

Вершина  $i$  добавляется в сообщество, для которого этот прирост является максимальным, но только если этот прирост будет положительным (в случае нескольких одинаковых приростов, например, берется последний из них). Если никаких положительных приростов нет,  $i$  остается в своем первоначальном сообществе.

Эта процедура применяется многократно и последовательно для всех вершин до тех пор, пока не будет достигнуто никакого дальнейшего улучшения приростов, и тогда первая фаза завершается.

Вторая фаза алгоритма заключается в создании нового графа, вершинами которого являются сообщества, найденные в результате первой фазы. Для этого ребрам между новыми вершинами присваиваются веса, которые вычисляются как сумма весов ребер между вершинами, принадлежащими двум разным сообществам (можно считать, что одиночное ребро изначально имеет вес 1). Ребра между вершинами одного и того же сообщества приводят к петлям для вершины, соответствующей этому сообществу в новом графе.

Как только вторая фаза будет завершена, можно будет выполнить следующий проход, начиная с применения первой фазы к полученной взвешенной сети.

Проходы повторяются итеративно до тех пор, пока значение модулярности растёт, то есть до достижения максимума модулярности.

**3. Нахождение сообществ как коалиционная игра.** В работе [15] предложен теоретико-игровой подход для выделения сообществ в графе, основанный на методах коалиционных гедонических игр [18]. Вершины в графе интерпретируются как игроки, отношения между которыми определяются с помощью функции предпочтения. С их помощью можно построить устойчивые коалиционные разбиения.

Предположим, что множество игроков  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  разбито на  $K$  коалиций  $\Pi = \{S_1, \dots, S_K\}$ . Пусть  $S_\Pi(i)$  обозначает коалицию  $S_k \in \Pi$ , где  $i \in S_k$ . Предпочтения игрока  $i$  представлены бинарным отношением  $\succsim_i$  (рефлексивным и транзитивным) на множестве  $\{S \subset N : i \in S\}$ . Предпочтения являются аддитивно сепарабельными [18], если существует такая функция  $v_i : N \rightarrow \mathbf{R}$ , что  $v_i = 0$  и:

$$S_1 \succsim_i S_2 \Leftrightarrow \sum_{j \in S_1} v_i(j) \geq \sum_{j \in S_2} v_i(j).$$

Предпочтения  $\{v_i, i \in N\}$  являются симметричными, то есть  $v_i(j) = v_j(i) = v_{ij} = v_{ji}$  для всех  $i, j \in N$ . Свойство симметрии является важным в теории гедонических игр.

Будем говорить, что коалиционное разбиение  $\Pi$  является Нэш-стабильным, если  $S_\Pi(i) \succsim_i S_k \cup \{i\}$  для всех  $i \in N, S_k \in \Pi \cup \{0\}$ . В Нэш-стабильном разбиении никому из игроков невыгодно переходить в другую коалицию.

Потенциалом коалиционного разбиения  $\Pi = \{S_1, \dots, S_K\}$  называется функция:

$$P(\Pi) = \sum_{k=1}^K P(S_k) = \sum_{k=1}^K \sum_{i, j \in S_k} v_{i, j}.$$

Разбиение  $\Pi = \{S_1, \dots, S_K\}$ , дающее максимум потенциала, является Нэш-стабильным. Для поиска стабильных разбиений можно воспользоваться следующей процедурой.

Начинаем с какого-то фиксированного разбиения  $N = \{S_1, \dots, S_K\}$ . Выберем игрока  $i$  и произвольную коалицию  $S_k$ , отличную от  $S_\Pi(i)$ . Если  $S_k \cup \{i\} \succsim_i S_\Pi(i)$ , переместим вершину  $i$  в коалицию  $S_k$ ; иначе оставим разбиение неизменным и выбираем другую пару кандидатов, и так далее. Так как число вершин конечно, алгоритм закончится за конечное число шагов с каким-то локальным максимумом потенциала.

В работе [15] предложено использовать функцию предпочтения с параметром  $\alpha \in [0, 1]$  следующего вида:

$$v_{ij} = \begin{cases} 1 - \alpha, & (i, j) \in E, \\ -\alpha, & (i, j) \notin E, \\ 0, & i = j. \end{cases}$$

Для любого подграфа  $(S, E | S), S \subseteq N$ , обозначим  $n(S)$  число вершин в  $S$ , и  $m(S)$  число ребер в  $S$ . Тогда потенциал можно представить как:

$$P(\Pi) = \sum_{k=1}^K \left( m(S_k) - \frac{n(S_k)(n(S_k) - 1)\alpha}{2} \right). \quad (2)$$

Для потенциала такого вида справедливо следующее утверждение.

*Теорема. Если  $\alpha = 0$ , то гранд-коалиция  $\Pi_N = \{N\}$  дает максимум потенциала. При  $\alpha \rightarrow 1$  максимум потенциала достигается на разбиении графа на максимальные клики.*

Также эффективным при разбиении на сообщества является использование при определении потенциала понятия модулярности, введенное в [13]. Для конфигурационной модели случайного графа формула модулярности (1) примет вид:

$$P(\Pi) = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j \in S_k, i \neq j} \left( A_{ij} - \gamma \frac{d_i d_j}{2m} \right). \quad (3)$$

где  $A_{ij}$  — количество ребер между вершинами  $i$  и  $j$ ,  $d_i$  — степень вершины  $i$ ,  $m$  — общее число ребер в графе,  $\gamma$  — параметр,  $0 < \gamma < 1$ .

В качестве примера рассмотрим граф, изображенный на рисунке 1.

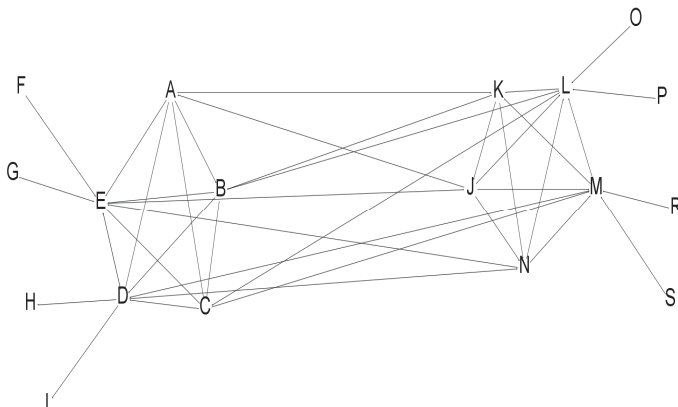


Рис. 1. Пример разбиения графа на сообщества

Граф состоит из двух полных подграфов:  $G_1 = \{A, B, C, D, E\}$  и  $G_2 = \{J, K, L, M, N\}$ . Помимо этого в графе есть 10 ребер между  $G_1$  и  $G_2$ ,

то есть таких  $(u, w)$ , что  $u \in G_1$  и  $w \in G_2$ . Наконец, есть еще 4 вершины, смежные с вершинами из  $G_1$ , и 4 вершины, смежные с  $G_2$ .

Наиболее естественным разбиением этого графа на два сообщества представляется  $\Pi_N = S_L \cup S_R = \{A, B, \dots, H, I\} \cup \{J, K, \dots, R, S\}$ , где первое сообщество — это вершины в левой части рисунка, а второе — вершины в правой части.

Если считать потенциал по формуле (3), то имеем:

$$P(S_L \cup S_R) = 28 - \gamma \cdot 31 \frac{13}{19}.$$

Если перевести вершину  $J$  в другое сообщество, то получим  $P(\{S_L \setminus J\} \cup \{S_R \cup J\}) = 26 - \gamma \cdot 32 \frac{12}{19}$ .

Важно, что неравенство  $P(\{S_L \cup S_R\}) > P(\{S_L \setminus J\} \cup \{S_R \cup J\})$  верно для любых значений  $0 < \gamma < 1$ . Другие разбиения на сообщества, которые можно получить из  $S_L \cup S_R$  путем перемещения только одной вершины, дают еще меньшие значения потенциала. То есть на  $S_L \cup S_R$  достигается локальный максимум потенциала, а значит, мы имеем устойчивое по Нэшу разбиение.

Вычислим потенциал согласно (2):  $P(S_L \cup S_R) = 28 - 72\alpha$ . Если переместить вершину  $J$  в другое сообщество, то получим  $P(\{S_L \setminus J\} \cup \{S_R \cup J\}) = 26 - 73\alpha$ , то есть первое разбиение всегда предпочтительнее в смысле (2).

Для этого примера путем полного перебора вариантов несложно показать, что  $P(S_L \cup S_R) > P(\Pi')$ , где  $\Pi'$  — разбиение, получаемое из  $S_L \cup S_R$  перемещением одной вершины, верно для всех  $\Pi'$  при любых значениях  $\alpha$ . Значит,  $S_L \cup S_R$  — стабильное по Нэшу разбиение в игре с потенциалом (2).

Но существуют и другие разбиения. Рассмотрим:

$$\begin{aligned} \Pi^* &= \{A, B, C, D, E, J, K, L, M, N\} \cup \\ &\cup \{F\} \cup \{G\} \cup \{H\} \cup \{I\} \cup \{O\} \cup \{P\} \cup \{R\} \cup \{S\}. \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} \Pi^{**} &= \{A, B, C, D, E\} \cup \{J, K, L, M, N\} \cup \\ &\cup \{F\} \cup \{G\} \cup \{H\} \cup \{I\} \cup \{O\} \cup \{P\} \cup \{R\} \cup \{S\}. \end{aligned}$$

По формуле (2) имеем потенциал  $P(\Pi^*) = 30 - 45\alpha > P(S_L \cup S_R)$  для любых  $\alpha$ . С другой стороны,  $P(\Pi^{**}) = 20 - 20\alpha > P(\Pi^*)$  при

$\alpha > \frac{2}{5}$ . То есть при больших  $\alpha$  разбиение на максимальные клики дает Нэш-стабильное разбиение. Это соответствует утверждению приведенной выше теоремы.

Если использовать (3), то  $P(\Pi^*) = 30 - \gamma \cdot 42 \frac{12}{19}$  и  $P(\Pi^*) > P(S_L \cup S_R)$  выполняется при  $\gamma < \frac{19}{108}$ . Но при таких  $\gamma$  разбиение  $\Pi^*$  не является Нэш-стабильным, и алгоритм поиска устойчивого разбиения объединяет все вершины в одно сообщество  $\Pi^* = \{A, B, \dots, R, S\}$ .

**4. Алгоритм поиска Нэш-стабильного разбиения.** Опишем алгоритм, который позволяет найти стабильное разбиение для функции потенциала (2) и фиксированного значения параметра  $\alpha$ . На вход алгоритм получает произвольное стартовое разбиение  $\Pi_0$ .

На каждой итерации алгоритма мы будем рассматривать текущее разбиение  $\Pi$  и каждое разбиение  $\Pi'_i$  из тех, что получается переводом игрока  $i \in S_{\Pi(i)}$  в коалицию  $S_k \in \Pi$ . Среди них будем выбирать такое разбиение  $\Pi'$ , что  $P(\Pi') - P(\Pi) \rightarrow \max$ . Если  $P(\Pi') - P(\Pi) > 0$ , то текущим разбиением становится  $\Pi'$ , иначе текущее разбиение  $\Pi$  и есть искомое стабильное разбиение.

Рассмотрим вначале потенциал в виде (2). Предположим, в текущем разбиении  $\Pi$  вершина  $i$  переводится из коалиции  $S_{\Pi(i)}$  в какую-то коалицию  $S_k$ . В коалиции  $S_k$  игрок  $i$  приобретает  $d_i(S_k \cup i)$  связей с весом  $1 - \alpha$  минус  $m(S_k) + 1 - d_i(S_k \cup i)$  связей с весом  $\alpha$ . Здесь  $d_i(S)$  обозначает степень вершины  $i$  в графе на множестве вершин  $S$ .

При этом игрок  $i$  теряет в старой коалиции  $d_i(S_{\Pi(i)})$  связей с весом  $1 - \alpha$  минус  $m(S_{\Pi(i)}) - d_i(S_{\Pi(i)})$  связей с весом  $\alpha$ . Таким образом, изменение потенциала равно:

$$P(\Pi') - P(\Pi) = d_i(S_k \cup i) - d_i(S_{\Pi(i)}) + \alpha(m(S_{\Pi(i)}) - m(S_k) - 1).$$

Если же игрок  $i$  станет индивидуальным, изменение потенциала станет равным:

$$P(\Pi') - P(\Pi) = -d_i(S_{\Pi(i)}) + \alpha(m(S_{\Pi(i)}) - 1).$$

Найдем изменение потенциала в виде (3).

Предположим, в текущем разбиении  $\Pi$  вершина  $i$  переходит из коалиции  $S_{\Pi(i)}$  в какую-то коалицию  $S_k$ . В коалиции  $S_k$  потенциал (3)

прирастает на  $d_i(S_k \cup i)$  связей минус  $\frac{\gamma \cdot d_i}{2m} \sum_{j \in S_k} d_j$ . При этом игрок  $i$

теряет в старой коалиции величину  $d_i(S_{\Pi(i)})$  связей минус

$$\frac{\gamma \cdot d_i}{2m} \sum_{j \in S_k \setminus i} d_j.$$

$$P(\Pi') - P(\Pi) = -d_i(S_{\Pi(i)}) + d_i(S_k \cup i) + \frac{\gamma \cdot d_i}{2m} \left( \sum_{j \in S_{\Pi(i)}} d_j - \sum_{j \in S_k} d_j \right) - \frac{\gamma \cdot d_i^2}{2m}.$$

Теперь вернемся к тому, как реализовать структуру данных для хранения сообщества. Наша структура хранения сообщества содержит следующие поля:

1. *Множество вершин.* Множество целых чисел — номеров вершин в сообществе. Пусть  $n$  — количество вершин в сообществе. Тогда операции добавления, удаления или проверки наличия номера имеют временную сложность  $O(\log n)$ , а получить все номера в виде списка можно за  $O(n)$ . Множество с таким набором операций можно реализовать или использовать готовую реализацию на основе сбалансированного дерева поиска.

2. *Список количеств общих ребер.* Пусть  $N$  — количество вершин во всем графе. В этом списке длины  $N$  в  $i$ -ом элементе будем хранить кэшированное количество ребер, один конец которых — вершина  $i$ , а второй конец принадлежит сообществу.

3. *Счетчик времени и массив временных отметок.* После добавления или удаления вершины из сообщества, кэшированные значения количества общих ребер становятся неактуальными. Поскольку пересчитывать их все сразу очень долго, отмечать каким-то образом, что они не актуальны тоже долго ( $O(N)$ ), то мы будем использовать счетчик времени и массив временных отметок (кэшированное значение актуально только тогда, когда его временная отметка совпадает со счетчиком времени). Отметим, что счетчик времени у каждого экземпляра структуры свой, не зависящий от других экземпляров.

4. *Количество вершин и количество ребер в сообществе, сумма степеней вершин и квадратов степеней.* Эти поля нам нужны для расчета потенциала сообщества.

Прокомментируем, как производить наименее тривиальные операции.

1. *Создание пустого сообщества.* Нам нужно выделить  $O(N)$  памяти на хранение структуры (считаем, что это можно сделать за  $O(1)$ ) и инициализировать  $O(1)$  полей.

2. *Удаление и добавление вершины в сообщество.* При удалении или добавлении вершины нужно делать следующее:

(а) Изменить значения количества вершин в сообществе, суммы степеней и квадратов степеней вершин.

(б) Пересчитать число ребер в сообществе. Для этого нужно перебрать все ребра, выходящие из добавляемой или удаляемой вершины, и посчитать у скольких из них второй конец принадлежит множеству вершин сообщества. Именно эта операция имеет сложность  $O(deg(v) \log_2 n)$ .

(с) Увеличить счетчик времени, чтобы кэшированное количество общих ребер для всех вершин стало неактуальным.

3. *Получить количество ребер, инцидентных данной вершине, которые ведут в сообщество.* Если временная отметка для данного номера вершины совпадает со счетчиком времени, то вернуть кэшированное значение. Иначе пересчитать и запомнить его за  $O(deg(v) \log_2 n)$ .

**5. Численные эксперименты.** В качестве примера было рассмотрено множество сайтов научных учреждений, входящих в состав Сибирского и Дальневосточного отделений Российской академии наук (далее — СО РАН и ДВО РАН) в их дореформенной версии. Общее количество сайтов научных учреждений (научных отделений, центров, институтов, библиотек, проектов) равно 140, из них 102 относятся к учреждениям СО РАН и 38 — ДВО РАН. Сайты связаны между собой 2315 гиперссылками. Данные о гиперссылках были взяты из базы данных внешних гиперссылок [19]. Сканирование веб-сайтов выполнялось с мая 2013 по март 2014 года с использованием краулера для сбора внешних гиперссылок BeeBot [20].

Часть сайтов научных учреждений СО РАН и ДВО РАН приведена в таблице 1. Сайты упорядочены по их доменным именам, в колонке *branch* стоит принадлежность соответствующему отделению.

Таблица 1. Множество исследуемых сайтов научных учреждений

№	URL	branch	Название учреждения
1	<i>509.tig.dvo.ru</i>	dvo	Технический сайт ТИГ ДВО
2	<i>tig.dvo.ru</i>	dvo	Тихоокеанский институт географии ДВО РАН
3	<i>alley.iis.nsk.su</i>	so	Аллея памяти ИСИ СО РАН
4	<i>www.iis.nsk.su</i>	so	Институт систем информатики имени А.П. Ершова СО РАН
5	<i>bionano.niboch.nsc.ru</i>	so	Научная конференция посвященная 25-летию юбилею ИХБиФМ СО РАН
6	<i>www.niboch.nsc.ru</i>	so	Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН
7	<i>ccu.kirensky.ru</i>	so	ЦКП КИЦ СО РАН
8	<i>kirensky.ru</i>	so	Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН
9	<i>www.sbras.nsc.ru</i>	so	Сибирское отделение РАН
..	....	...	.....
12	<i>crust.irk.ru</i>	so	<b>Институт земной коры СО РАН</b>
13	<i>sifibr.irk.ru</i>	so	<b>Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН</b>
14	<i>www.gs.nsc.ru</i>	so	Геофизическая служба СО РАН
15	<i>www.igc.irk.ru</i>	so	Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
16	<i>www.irigs.irk.ru</i>	so	<b>Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН</b>
17	<i>www.isc.irk.ru</i>	so	<b>Иркутский научный центр СО РАН</b>
18	<i>www.lin.irk.ru</i>	so	Лимнологический институт СО РАН
19	<i>www.sei.irk.ru</i>	so	<b>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН</b>
20	<i>ecrin.ru</i>	dvo	Институт экономических исследований ДВО РАН
21	<i>forest.akadem.ru</i>	so	Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
22	<i>icarp.ru</i>	dvo	Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН
23	<i>ivep.as.khb.ru</i>	dvo	Институт водных и экологических проблем ДВО РАН
24	<i>www.febras.ru</i>	dvo	Дальневосточное отделение РАН
..	...	...	.....
46	<i>imbt.ru</i>	so	<b>Институт монголоведения, буддологии и тибетологии СО РАН</b>
47	<i>old.imbt.ru</i>	so	<b>Институт монголоведения, буддологии и тибетологии СО РАН (старый сайт)</b>
..	...	...	.....
128	<i>bibl.history.nsc.ru</i>	so	<b>Библиотека Института истории СО РАН</b>
129	<i>www.icc.irk.ru</i>	so	<b>Институт динамики систем и теории управления СО РАН</b>
130	<i>www.icms.kemsc.ru</i>	so	Институт углекислотной и химического материаловедения СО РАН
131	<i>baikalmuseum.irk.ru</i>	so	<b>Байкальский музей Иркутского научного центра СО РАН</b>
..	...	...	.....
136	<i>med.isc.irk.ru</i>	so	<b>Больница Иркутского НИИ СО РАН</b>
..	...	...	.....
140	<i>gallery.hcei.tsc.ru</i>	so	Gallery ИСЭ СО РАН



Веб-граф  $G_{so+dvo}$  представляет собой, в зависимости от используемого метода, ориентированный или неориентированный граф без кратных дуг и петель, дуга в графе появляется в том случае, когда есть хотя бы одна гиперссылка, связывающая соответствующие сайты-вершины.

Вследствие удаления кратных дуг количество дуг в исследуемом графе равно 633, а количество вершин — 140. Неориентированный граф получается из ориентированного графа заменой дуг на ребра.

Из большого количества проведенных экспериментов приведем только результаты наиболее характерных разбиений на 2 и 5 сообществ. Как уже упоминалось ранее, методы, реализация в виде алгоритмов и полученные результаты будем обозначать с использованием первых букв фамилий авторов NG, BGLL и АКМ.

Для метода АКМ были реализованы два алгоритма, использующих формулы (2) и (3) для вычисления потенциалов, однако в статье оставлены только результаты по формуле (3), поскольку оба метода дают практически одинаковые разбиения.

Разбиение  $G_{so+dvo}$  на два сообщества методами NG, BGLL и АКМ дает одинаковый результат: в первое сообщество входят все вершины, соответствующие сайтам СО РАН, а во второе — ДВО РАН.

Результаты разбиений  $G_{so+dvo}$  на пять сообществ сведены в таблицу 2, где  $C1$ - $C5$  используются для обозначения сообществ.

Таблица 2. Основные результаты экспериментов

<i>Method</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
<i>NG</i>	98	38	2	1	1
<i>AKM</i>	91	38	7	2	2
<i>BGLL</i>	46	38	21	18	10

В позиции на пересечении названия метода и сообщества указывается мощность данного сообщества. Сообщества упорядочены по мощностям слева направо.

Заметим, что для всех трех методов полученные сообщества  $C2$  содержат по 38 вершин, в точности соответствующих веб-сайтам ДВО РАН. Естественно, сообщества  $C1$ ,  $C3$ ,  $C4$  и  $C5$  для всех трех случаев содержат сайты СО РАН, имея разные мощности в зависимости от используемого метода.

Начнем с последнего. Метод BGLL дает разбиения на сообщества, достаточно большие по количеству участников. Так  $C1$  содержит 46 сайтов, включая официальный сайт Сибирского отделения РАН и сайты 7 научных центров (из 8), больше ориентированных на административные связи. Сообщество  $C3$  можно назвать «физико-химическим», а  $C4$  — «компьютерно-моделирующим» по входящим в

них сайтам научных учреждений. Сообщество  $C5$  содержит 10 (из 12) сайтов Иркутского научного центра.

На рисунке 2 приведен пример разбиения на сообщества по методу АКМ. Сообщество в  $C2$  правом эллипсе целиком состоит из сайтов ДВО РАН. Внутри эллипса, названного СО РАН, содержатся 4 сообщества:  $C1$  — это 91 сайт, включая официальный сайт Сибирского отделения РАН.

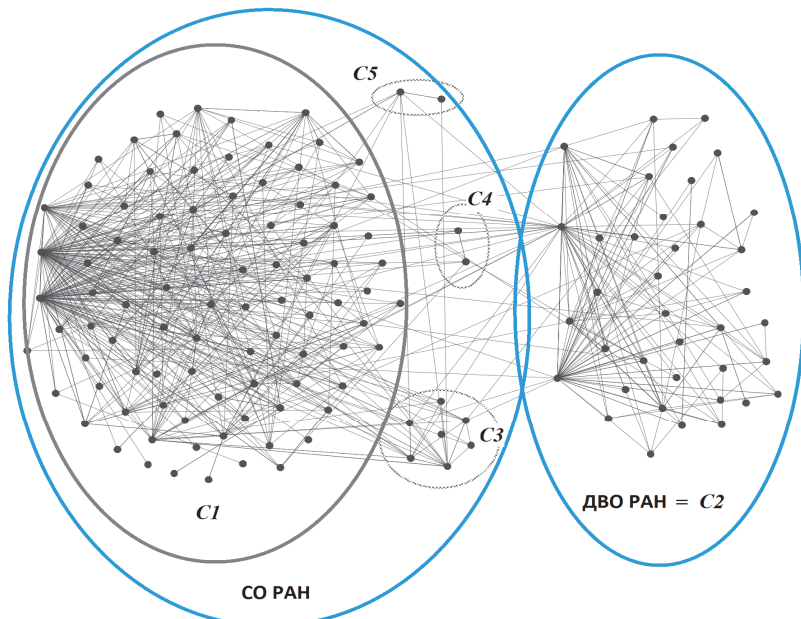


Рис. 2. Пример разбиения графа  $G_{so+ dvo}$  на сообщества по методу АКМ

Сообщество  $C3$  представляет собой 7 сайтов организаций, входящих в состав Иркутского научного центра СО РАН:

- Института земной коры СО РАН;
- Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН;
- Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН;
- Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН;
- Института динамики систем и теории управления СО РАН;
- самого Иркутского научного центра СО РАН;
- и даже Больницы Иркутского научного центра СО РАН.

В таблице 1 данные об этих сайтах выделены полужирным шрифтом.

В состав  $C_4$  входят два сайта: Лимнологического института СО РАН и «Информационные ресурсы Лимнологического института СО РАН».

В состав  $C_5$  также входят два сайта: Омского научного центра СО РАН и Института проблем переработки углеводов СО РАН, входящего в состав этого же центра.

На рисунке 3 приведен пример разбиения на сообщества по методу NG. Здесь так же, как и в случае АКМ, характерно наличие большого сообщества  $C_1$ , содержащего 98 сайтов, включая официальный сайт Сибирского отделения РАН.

Как и в предыдущем примере сообщество  $C_2$  целиком состоит из сайтов ДВО РАН. Кроме того, метод NG формирует еще три небольших сообщества, причем два из них вырожденные и содержащие по одному сайту.

Сообщество  $C_3$  состоит из двух сайтов Института монголоведения, буддологии и тибетологии СО РАН (нового и старого). Сообщества  $C_4$  и  $C_5$  и вовсе состоят из одиночных сайтов Байкальского музея Иркутского научного центра СО РАН и Библиотеки Института истории СО РАН. В таблице 1 данные об этих сайтах также выделены полужирным шрифтом.

Заметим, однако, что данное разбиение не является Нэш-стабильным.

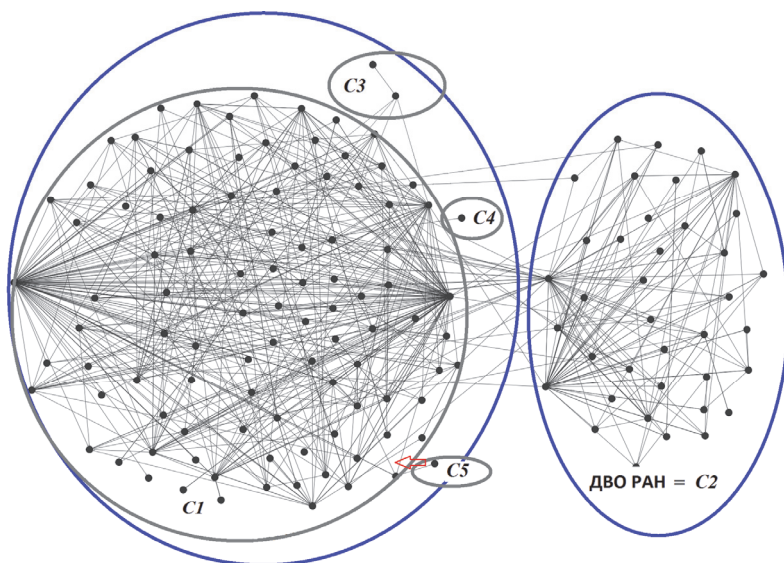


Рис. 3. Пример разбиения графа  $G_{so+dvo}$  на сообщества по методу NG

Действительно, потенциал такого разбиения равен  $1190 - \gamma \cdot \frac{472962}{633}$ . Но если переместить, например, вершину, соответствующую сайту Библиотеки Института истории СО РАН (C5), в общество СО РАН (C1), — это продемонстрировано стрелкой на рисунке 3, — то значение потенциала увеличится и станет равным  $1192 - \gamma \cdot \frac{473903}{633}$ , что превосходит предыдущее значение при  $\gamma < \frac{633}{469}$ , то есть при любых  $0 < \gamma < 1$ . То же самое относится и к разбиению на сообщества по методу BGLL.

**6. Заключение.** В работе предложен метод нахождения разбиений графа, основанный на принципиально новой идее коалиционных игр, который дает результаты, не уступающие по содержательной интерпретации двум известным и широко распространенным методам. Для этого определяется специальным образом коалиционная игра, в которой вершины графа являются игроками, и предпочтения игроков определяются бинарным отношением на множестве коалиций. После этого находится стабильное коалиционное разбиение, в котором никому из игроков не выгодно менять свою коалицию.

Этот метод реализован в виде алгоритма, который апробирован при кластеризации множества сайтов научных организаций Сибирского и Дальневосточного отделений РАН. Приведены результаты численных экспериментов на данном фрагменте Веба. При анализе веб-пространств организаций можно рекомендовать использование всех трех методов с возможностью получения окончательного результата как комбинации трех частных результатов на основе их содержательного анализа.

## Литература

1. *Theilwall M.* Webometrics and Social Web Research Methods // University of Wolverhampton. 2013. 140 p.
2. *Hall W., Tiropanis T.* Web evolution and Web Science // Computer Networks. 2012. vol. 56, no. 18. pp. 3859–3865.
3. *Шокин Ю.И. и др.* Анализ веб-пространства академических сообществ методами вебометрики и теории графов // Информационные технологии. 2014. № 12. С. 31–40.
4. *Шокин Ю.И. и др.* Исследование научного веб-пространства Сибирского отделения Российской академии наук // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17. № 6. С. 86–98.
5. *Веснин А.Ю., Константинова Е.В., Савин М.Ю.* О сценариях присоединения новых сайтов к веб-пространству СО РАН // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11. № 4. С. 28–37.
6. *Клименко О.А.* Модели представления академического веб-пространства // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 2. С. 103–110.
7. *Корелин В.Н., Блеканов И.С., Сергеев С.Л.* Применение модифицированного алгоритма LSH для кластеризации внешнего окружения веб-пространства университетов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 5 (229). С. 79–87.
8. *Bonato A., Graham F. C., Pralat P.* Algorithms and Models for the Web Graph // Proceedings of the 13th International Workshop (WAW 2016). 2016. vol. 10088. 165 p.

9. *Flake G.W., Lawrence S.R., Giles C.L., Coetzee F.M.* Self-Organization and Identification of Web Communities // *IEEE Computer*. 2002. vol. 35. no. 3. pp. 66–71.
10. *Labatut V., Balasque J.-M.* Detection and Interpretation of Communities in Complex Networks: Practical Methods and Application // *Computational Social Networks*. 2012. pp. 81–113.
11. *Avrachenkov K., El Chamie M., Neglia G.* Graph clustering based on mixing time of random walks // *Proceedings of IEEE ICC 2014*. 2014. pp. 4089–4094.
12. *Newman M.E.J.* Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices // *Phys. Rev.* 2006. vol. 74. no. 3. pp. 036104.
13. *Girvan M., Newman M.E.J.* Community structure in social and biological networks // *Proc. of National Academy of Science*. 2002. vol. 99(12). pp. 7821–7826.
14. *Blondel V.D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E.* Fast unfolding of communities in large networks // *Journal of statistical mechanics: theory and experiment*. 2008. pp. P10008.
15. *Avrachenkov K.E., Kondratev A.Yu., Mazalov V.V.* Cooperative Game Theory Approaches for Network Partitioning // *International Computing and Combinatorics Conference*. 2017. LNCS 10392. pp. 591–602.
16. Gephi – The Open GraphViz Platform. URL: [www.gephi.org](http://www.gephi.org) (дата обращения: 09.06.2017).
17. *DeDeo S., Krakauer D.* Dynamics and Processing in Finite Self-Similar Networks // *Journal of the Royal Society Interface*. 2012. vol. 9. no. 74. pp. 2131–2144.
18. *Bogomolnaia A., Jackson M.O.* The stability of hedonic coalition structures // *Games and Economic Behavior*. 2002. vol. 38. no. 2. pp. 201–230.
19. *Головин А.С., Печников А.А.* База данных внешних гиперссылок для исследования фрагментов Веба // Информационная среда вуза XXI века: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. Петрозаводск. 2013. С. 55–57.
20. *Pechnikov A.A., Chernobrovkin D.I.* Adaptive Crawler for External Hyperlinks Search and Acquisition // *Automation and Remote Control*. 2014. vol. 75. no. 3. pp. 587–593.

**Ермолин Николай Александрович** — студент, Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ). Область научных интересов: алгоритмы и структуры данных. Число научных публикаций — 1. [nikolayermolin@yahoo.com](mailto:nikolayermolin@yahoo.com); пр. Ленина, 33, Петрозаводск, 185910, Республика Карелия, РФ; р.т.: +7(814-2)71-10-01.

**Мазалов Владимир Викторович** — д-р физ.-мат. наук, профессор, временно исполняющий обязанности директора, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук (ИПМИ КарНЦ РАН), руководитель лаборатории математической кибернетики, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук (ИПМИ КарНЦ РАН). Область научных интересов: теория игр, стохастическое динамическое программирование, математическая биология. Число научных публикаций — 156. [vlmazalov@yandex.ru](mailto:vlmazalov@yandex.ru), <http://www.krc.karelia.ru/HP/mazalov/>; ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910, Республика Карелия, РФ; р.т.: +7(8142)78-11-08, Факс: +7(8142)76-63-13.

**Печников Андрей Анатольевич** — д-р техн. наук, доцент, руководитель лаборатории телекоммуникационных систем, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук (ИПМИ КарНЦ РАН), главный научный сотрудник лаборатории телекоммуникационных систем, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук (ИПМИ КарНЦ РАН). Область научных интересов: вебметрия, дискретная математика и математическая кибернетика, программные системы и модели. Число научных публикаций — 150. [pechnikov@krc.karelia.ru](mailto:pechnikov@krc.karelia.ru), <http://www.krc.karelia.ru/HP/pechnikov/>; ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910, Республика Карелия, РФ; р.т.: +7(8142)78-11-08, Факс: +7(8142)76-63-13.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 16-51-5506, 15-02-00352 и 15-01-06105).

N.A.ERMOLIN, V.V. MAZALOV, A.A. PECHNIKOV  
**GAME-THEORETIC METHODS FOR FINDING COMMUNITIES  
 IN ACADEMIC WEB**

---

*Ermolin N.A., Mazalov V.V., Pechnikov A.A. Game-Theoretic Methods for Finding Communities in Academic Web.*

**Abstract.** We consider the problem of community detection for the graph which is a fragment of the academic Web. The nodes of the graph are the sites of the scientific organizations, and its arcs are hyperlinks. We propose a new approach based on the methods of coalition game theory to derive the Nash-stable coalition partition. This is determined by a function of preferences for any pair of vertices in the graph. The problem of finding a stable partition is connected with finding a maximum of potential function. The algorithm for searching stable partitioning and evaluating its complexity is presented. The proposed method was compared with two well-known methods of finding communities. The efficiency of the new method is demonstrated on the fragment of the Web which consists of the official sites of the Siberian and Far East branches of RAS.

**Keywords:** web space, graph, community, modularity, coalition game theory.

---

**Ermolin Nikolay Aleksandrovich** — student, Petrozavodsk State University (PetrSU). Research interests: algorithms and data structures. The number of publications — 1. nikolayermolin@yahoo.com; 33, Lenin Str., 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia; office phone: +7(814-2)71-10-01.

**Mazalov Vladimir Victorovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, interim director, Institute of Applied Mathematical Research Karelian Research Centre of Russian Academy of Science, head of mathematical cybernetics laboratory, Institute of Applied Mathematical Research Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Research interests: webometrics, discrete mathematics, mathematical cybernetics, software systems and models. The number of publications — 156. vlmazalov@yandex.ru, <http://www.krc.karelia.ru/HP/mazalov>; 11, Pushkinskaya str., Petrozavodsk, 185910, Republic of Karelia, Russia, Russia; office phone: +7(8142)78-11-08, Fax: +7(8142)76-63-13.

**Pechnikov Andrey Anatolievich** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of telecommunications systems laboratory, Institute of Applied Mathematical Research Karelian Research Centre of Russian Academy of Science, chief researcher of telecommunications systems laboratory, Institute of Applied Mathematical Research Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Research interests: webometrics, discrete mathematics, mathematical cybernetics, software systems and models. The number of publications — 150. pechnikov@krc.karelia.ru, <http://www.krc.karelia.ru/HP/pechnikov>; 11, Pushkinskaya str., Petrozavodsk, 185910, Republic of Karelia, Russia, Russia; office phone: +7(8142)78-11-08, Fax: +7(8142)76-63-13.

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grants №№ 16-51-5506, 15-02-00352 and 15-01-06105).

### References

1. Thelwall M. Webometrics and Social Web Research Methods. University of Wolverhampton. 2013. 140 p.

2. Hall W., Tiropanis T. Web evolution and Web Science. *Computer Networks*. 2012. vol. 56. no. 18. pp. 3859–3865.
3. Shokin Yu.I. et al. [Analysis of web-space of academic communities by methods of Webometrics and graph theory]. *Informacionnye tehnologii – Information technology*. 2014. vol. 12. pp. 31–40. (In Russ.).
4. Shokin Yu.I. et al. [A study of the academic web space of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences]. *Informacionnye tehnologii – Information technology*. 2012. vol. 17. pp. 86–98. (In Russ.).
5. Vesnin A.Yu., Konstantinova E.V., Savin M.Yu. [On scenarios of joining new sites to the webspace of the SB RAS]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informacionnye tehnologii – Novosibirsk State University Journal of Information Technologies*. 2013. Issue 11. vol. 4. pp. 28–37. (In Russ.).
6. Klimenko O.A. [Models of the representation of academic web space]. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii – Information and mathematical technologies in science and management*. 2016. № 2. pp. 103–110. (In Russ.).
7. Korelin V.N., Blekanov I.S., Sergeev S.L. [The modified algorithm LSH for clustering external web space universities]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Informatika. Telekomunikacii. Upravlenie – Scientific-technical Bulletin of Saint-Petersburg state Polytechnic University. Informatics. Telecommunications. Management*. 2015. vol. 5 (229). pp. 79–87. (In Russ.).
8. Bonato A., Graham F. C., Pralat P. Algorithms and Models for the Web Graph. Proceedings of the 13th International Workshop (WAW 2016). 2016. vol. 10088. 165 p.
9. Flake G.W., Lawrence S.R., Giles C.L., Coetzee F.M. Self-Organization and Identification of Web Communities. *IEEE Computer*. 2002. vol. 35. no. 3. pp. 66–71.
10. Labatut V., Balasque J.-M. Detection and Interpretation of Communities in Complex Networks: Practical Methods and Application. *Computational Social Networks*. 2012. pp. 81–113.
11. Avrachenkov K., El Chamie M., Neglia G. Graph clustering based on mixing time of random walks. Proceedings of IEEE ICC 2014. 2014. pp. 4089–4094.
12. Newman M.E.J. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices. *Phys. Rev*. 2006. vol. 74. no. 3. pp. 036104.
13. Girvan M., Newman M.E.J. Community structure in social and biological networks. *Proc. of National Academy of Science*. 2002. vol. 99(12). pp. 7821–7826.
14. Blondel V.D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of statistical mechanics: theory and experiment*. 2008. pp. P10008.
15. Avrachenkov K.E., Kondratev A.Yu., Mazalov V.V. Cooperative Game Theory Approaches for Network Partitioning. International Computing and Combinatorics Conference. 2017. LNCS 10392. pp. 591–602.
16. Gephi – The Open Graph Viz Platform. Available at: [www.gephi.org](http://www.gephi.org) (accessed: 09.06.2017).
17. DeDeo S., Krakauer D. Dynamics and Processing in Finite Self-Similar Networks. *Journal of the Royal Society Interface*. 2012. vol. 9. no. 74. pp. 2131–2144.
18. Bogomolnaia A., Jackson, M.O. The stability of hedonic coalition structures. *Games and Economic Behavior*. 2002. vol. 38. no. 2. pp. 201–230.
19. Golovin A.S., Pechnikov A.A. [Database external hyperlinks for the study of fragments of the Web]. *Informacionnaja sreda vuza XXI veka: materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferencii* [The information environment of the University of the XXI century: materials of VII all-Russian scientific-practical conference]. Petrozavodsk. 2013. pp. 55–57. (In Russ.).
20. Pechnikov A.A., Chernobrovkin D.I. Adaptive Crawler for External Hyperlinks Search and Acquisition. *Automation and Remote Control*. 2014. vol. 75. no. 3. pp. 587–593.

## ЮБИЛЕИ УЧЕНЫХ

---

*Дорогой Владимир Иванович!*



Коллектив сотрудников Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук сердечно поздравляет Вас со знаменательным юбилеем — 80-летием со дня рождения.

Ваш славный путь от слушателя Военной академии имени А.Ф. Можайского, офицера боевых частей РВСН до полковника, военного ученого и педагога — яркий пример служения Родине и науке.

Придя в наш институт уже известным ученым и специалистом, Вы смело взялись за решение сложных проблем принятия решений и обработки информации в распределенных вычислительных сетях на основе современных достижений в области информационных технологий и искусственного интеллекта, основали новое в нашем институте научное направление — многоагентные технологии.

Невозможно переоценить Ваши научные достижения в этой области. Вы стояли у истоков этого научного направления, были пионером в решении теоретических и прикладных задач разработки многоагентных систем. Вы никогда не ограничивались рамками академической науки, все Ваши работы отличаются ярко выраженной прикладной направленностью.

Ваша исключительная эрудиция ученого и опытного специалиста позволили Вам получить передовые результаты, признанные не только в России, но и за рубежом.

Сегодня Вы, маститый ученый, доктор наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, встречаете свой 80-летний юбилей в прекрасной научной и физической форме. Всегда стройный, подтянутый, элегантный Вы подаете пример друзьям и коллегам Вашим жизнеутверждающим примером. Ни должности, ни звания, ни время не нанесли ущерба Вашей глубокой интеллигентности в российской понимании этого слова.

Поздравляем Вас, дорогой Владимир Иванович, и желаем Вам здоровья и новых творческих успехов!

*Коллектив Санкт-Петербургского института информатики  
и автоматизации Российской академии наук*



*Дорогой Вадим Петрович!*



Коллектив Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук сердечно поздравляет Вас со знаменательной датой — 80-летием со Дня рождения.

Ваш славный трудовой путь — достойный пример добросовестного исполнения человеческого предназначения, за которым стоят: учеба в замечательном ленинградском Вузе — ЛЭТИ, служба в Вооруженные Силах на космодроме Байконур, где Вы принимали участие в запуске первых пилотируемых космических аппаратов, преподавательская и научная работа в Военно-

космической академии имени А.Ф. Можайского и параллельная учеба в лучшем вузе страны — Ленинградском государственном университете, где Вы получили специальность «математика».

Мы рады, что после увольнения в запас полковником Вы пришли в коллектив нашего института. Вы стояли у истоков информатизации общества и внесли существенный вклад в становление и развитие этих процессов в Санкт-Петербурге. Более пятнадцати лет Вы являетесь бессменным Ученым секретарем основных конференций института — «Региональная информатика» и «Информационная безопасность регионов России».

В нашем коллективе Вы завоевали глубокое уважение не только своими научными достижениями, но и замечательными человеческими качествами — интеллигентностью, добропорядочностью, приветливостью и отзывчивостью.

От всей души желаем Вам, дорогой Вадим Петрович, крепкого здоровья, долгих лет активной творческой деятельности, счастья Вам и Вашей семье, дальнейшей плодотворной работы на благо нашего института.

*Коллектив Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук*

## КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ СПИИРАН

	<p>The 26th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing 21-23 March 2018 Cambridge, UK Труды индексируются в Scopus Сайт: <a href="http://www.comsec.spb.ru/pdp2018/">http://www.comsec.spb.ru/pdp2018/</a></p>
	<p>XIII Международная конференция по электромеханике и робототехнике (ER(ZR)-2018) 18-21 апреля 2018 г Санкт-Петербург Труды индексируются в WoS, Scopus, РИНЦ Сайт: <a href="http://confs.guap.ru/zav-read">confs.guap.ru/zav-read</a></p>
	<p>Санкт-Петербургская летняя молодежная школа «Информационные технологии в логистике» 6-8 июня 2018 г. Санкт-Петербург, Россия Труды индексируются в РИНЦ Сайт: <a href="http://www.spiras.nw.ru">www.spiras.nw.ru</a></p>
	<p>3-я Международная конференция «Интерактивная коллаборативная робототехника» (ICR-2018). 18-22 сентября 2018 г. Лейпциг, Германия Труды индексируются в WoS, Scopus, РИНЦ Сайт: <a href="http://specom.nw.ru/icr">specom.nw.ru/icr</a></p>
	<p>20 Международная конференция «Речь и Компьютер» (SPECOM-2018). 18-22 сентября 2018 г. Лейпциг, Германия Труды индексируются в WoS, Scopus, РИНЦ Сайт: <a href="http://specom.nw.ru">specom.nw.ru</a></p>
	<p>IV Межрегиональная научно-практическая конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий» 18-22 сентября 2018 г. Севастополь, Россия Труды индексируются в РИНЦ Сайт: <a href="http://pnroit.code-bit.com">http://pnroit.code-bit.com</a></p>
	<p>XVI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2018)» 24-26 октября 2018 г. Санкт-Петербург, Россия Труды индексируются в РИНЦ Сайт: <a href="http://www.spoisu.ru">http://www.spoisu.ru</a></p>

---

Signed to print 27.11.2017

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 г.  
Subscription Index П5513, Russian Post Catalog

---

Подписано к печати 27.11.2017. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 15,93. Заказ № 503.

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 П5513 по каталогу «Почта России»

## РУКОВОДСТВО ДЛЯ АВТОРОВ

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. Объем основного текста – от 15 до 25 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.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

### AUTHOR GUIDELINES

Interaction between each potential author and the Editorial board is realized through the personal account on the website of the journal "Proceedings of SPIIRAS" <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. At the registration the authors are requested to fill out all data fields in the proposed form.

The submissions should be prepared using MS Word 2007 text editor or higher versions, at that, only manuscripts in \*.docx format will be considered. The text of the paper in the main part of it should be from 15 – 25 pages of A5 size that is 210 X 148 mm; orientation – portrait; all margins – 20 mm. The font of the main paper text is Times New Roman of 10 pt font size. The pages' headers and footers should be empty; indentation – 10 mm; line spacing – single; pages are not numbered; hyphenations are allowed.

Certain figures, tables, listings and formulas are allowed in the main section, and their typography is considered by the paper template in more detail in journal web.

