

ISSN 1684–8853

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

6(91)/2017

6(91)/2017

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

**Founder**

«Information and Control Systems», Ltd.

**Publisher**Saint-Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**M. Sergeev  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia**Deputy Editor-in-Chief**E. Krouk  
Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Council**C. Christodoulou  
PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA  
L. Chubraeva  
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaL. Fortuna  
PhD, Professor, Catania, ItalyA. Fradkov  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaV. Kozlov  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaB. Meyer  
Dr. Sc., Professor, Zurich, SwitzerlandA. Ovodenko  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaY. Podoplyokin  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaYu. Shokin  
RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, RussiaV. Simakov  
Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, RussiaV. Vasilev  
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaR. Yusupov  
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia**Editorial Board**V. Anisimov  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaB. Bezruchko  
Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, RussiaN. Blaunstein  
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, IsraelA. Dudin  
Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, BelarusI. Dumer  
PhD., Professor, Riverside, USAV. Khimenko  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaG. Maltsev  
Dr. Sc., Tech, Professor, St. Petersburg, RussiaG. Matvienko  
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Tomsk, RussiaV. Melekhin  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaA. Shalyto  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaA. Shelupanov  
Dr. Sc., Tech., Professor, Tomsk, RussiaA. Shepeta  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaA. Smirnov  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaZ. Yuldashev  
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, RussiaA. Zeifman  
Dr. Sc., Phys.-Math., Vologda, Russia**Editor:** A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, A. Koleshko**Layout and composition:** J. Umnitsina**Contact information**The Editorial and Publishing Center, SUAI  
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia  
Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [i-us.spb@gmail.com](mailto:i-us.spb@gmail.com)  
Tel.: +7 - 812 494 70 02The Journal was registered in the Ministry of Press,  
Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation.  
Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002.  
Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom,  
Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR)  
due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd.,  
JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

© Corporate authors, 2017

**THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS****Sergeev A. M., Blaunstein N. Sh.** Orthogonal Matrices with Symmetrical Structures for Image Processing 2**Kuchmin A. Yu.** Analysis of Polynomial Restrictions using Decision Tree Method 9**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL****Neretina V. V., Efanov V. N.** Algorithm of Color Fusion for Multispectral Grayscale Images based on K-Means Clustering of Sample Image 15**Knyazhsky A. Yu., Nebylov A. V., Nebylov V. A.** Improving GEV Aerodynamic Quality by Enveloping Sea Waves 24**Sulavko A. E., Samotuga A. E.** Impact of Psycho-Physiological State of Signers on Biometric Parameters of Manuscript Images and Results of their Verification 29**Ryzhikov D. M.** Heracleum Sosnowskiy Growth Area Control by Multispectral Satellite Data 43**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Smirnov P. I., Tatarnikova T. M., Yagotinceva N. V.** Methodological Support of Ship Geoinformation System Formation 52**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Solov'eva T. N., Perevaryukha A. Yu.** Model of Caspian Stellate Sturgeon Stock Depletion with Cyclic Component of Population Dynamics 58**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES****Egorova I. S., Itsykson V. M.** Survey of Static Methods for Partial Software Library Specifications Extraction 66**INFORMATION SECURITY****Doynikova E. V., Chechulin A. A., Kotenko I. V.** Computer Network Security Evaluation based on CVSS Metrics 76**Bezzateev S. V., Voloshina N. V.** Masking Compression based on Weighted Image Structure Model 88**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION****Egorov N. D., Novikov D. V., Gilmutdinov M. R.** Lossless Image Compression using Binary Layers Scanning Data Encoding 96**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM****Bakin E. A., Evseev G. S., Smirnov K. N.** Algorithms of Convergecast Schedule Calculation for a Sensor Network Model with Regular Grid Topology 107**SYSTEM ANALYSIS****Smirnov A. V., Levashova T. V.** Knowledge Acquisition in Socio-Cyber Physical Systems through Information Exchange between Resources 113**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS****Skazkina V. V., Borovkova E. I., Kulminskiy D. D., Butenko A. A., Galushko T. A., Shvartz V. A.** Slow Dynamics in Synchronization of Contours of Autonomic Regulation of Cardiovascular Rhythm 123**BRIEF SCIENTIFIC REPORTS****Stepanov P. A., Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V.** Visualization of Technical Status of Complex Objects using Computational Models 132**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Contents of the journal «Informatisionno-upravliaiushchie sistemy (Information and Control Systems)» for 2017 143

Submitted for publication 03.11.17. Passed for printing 21.12.17. Format 60×84<sub>1/8</sub>.  
Phototype SchoolBookC. Digital printing.Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI,  
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia  
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI,  
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, RussiaThe journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue:  
№ 15385 — semiannual subscript.

6(91)/2017

ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫ

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

## Учредитель

ООО «Информационно-управляющие системы»

## Издатель

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

## Главный редактор

М. Б. Сергеев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

## Зам. главного редактора

Е. А. Крук,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

## Ответственный секретарь

О. В. Муравцова

## Редакционный совет:

**Председатель** А. А. Оводенко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Н. Васильев,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Н. Козлов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
К. Кристофолу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США  
Б. Мейер,  
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария  
Ю. Ф. Подоплекин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. В. Симаков,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ  
Л. Фортуня,  
д-р наук, проф., Катания, Италия  
А. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Л. И. Чубраева,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ  
Ю. И. Шокин,  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ  
Р. М. Юсупов,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

## Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Б. П. Безручко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ  
Н. Блаунштейн,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль  
А. Н. Дудин,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь  
И. И. Думер,  
д-р наук, проф., Риверсайд, США  
А. И. Зейфман,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ  
Г. Н. Мальцев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Г. Г. Матвиенко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ  
В. Ф. Мелехин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. И. Хименко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. А. Шальто,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. А. Шелупанов,  
д-р техн. наук, проф., Томск, РФ  
А. П. Шепета,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
З. М. Юлдашев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

## Редактор: А. Г. Ларионова

## Корректор: Т. В. Звертановская

## Дизайн: М. Л. Черненко, А. Н. Колешко

## Компьютерная верстка: Ю. В. Умнищина

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,  
сайт: http://i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,  
телевидения и средств массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.  
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

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».  
© Коллектив авторов, 2017

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

**Сергеев А. М., Блаунштейн Н. Ш.** Ортогональные матрицы  
симметричных структур для задач цифровой обработки изображений 2  
**Кучмин А. Ю.** Анализ полиномиальных ограничений методом дерева  
решений 9

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

**Неретина В. В., Ефанов В. Н.** Алгоритм вычисления цветových  
характеристик полутонного комплексированного многоспектрального  
изображения на основе кластеризации изображения-эталоны 15  
**Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А.** Увеличение  
аэродинамического качества экраноплана за счет огибания волн 24  
**Сулаво А. Е., Самотуга А. Е.** Влияние психофизиологического  
состояния подписантов на биометрические параметры рукописных  
образов и результаты их верификации 29  
**Рыжиков Д. М.** Метод обработки мультиспектральных спутниковых  
данных для решения задачи контроля зон произрастания  
борщевика Сосновского 43

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

**Смирнов П. И., Татарникова Т. М., Ягогинцева Н. В.** Методическое  
обеспечение формирования облика геоинформационной системы  
морского судна 52

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

**Соловьева Т. Н., Переварюха А. Ю.** Модель сценария деградации  
каспийской севрюги с осциллирующей составляющей  
популяционной динамики 58

## ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

**Егорова И. С., Ицыксон В. М.** Обзор статических методов  
восстановления частичных спецификаций программных библиотек  
на основе анализа программных проектов 66

## ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

**Дойникова Е. В., Чечулин А. А., Котенко И. В.** Оценка защищенности  
компьютерных сетей на основе метрик CVSS 76  
**Беззатеев С. В., Волошина Н. Ш.** Маскирующее сжатие на основе  
модели взвешенной структуры изображения 88

## КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

**Егоров Н. Д., Новиков Д. В., Гильмутдинов М. Р.** Метод сжатия  
изображений без потерь с помощью контекстного  
кодирования по двоичным уровням 96

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

**Бакин Е. А., Евсеев Г. С., Смирнов К. Н.** Разработка и анализ алгоритмов  
сбора информации для одной модели телекоммуникационной  
системы с топологией «правильная решетка» 107

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

**Смирнов А. В., Левашова Т. В.** Приобретение знаний  
в социобиологических системах в процессе информационного  
взаимодействия ресурсов 113

## УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

**Сказкина В. В., Боровкова Е. И., Кульминский Д. Д., Бутенко А. А.,  
Галушко Т. А., Шварц В. А.** Медленная динамика степени  
синхронизованности контуров вегетативной регуляции ритма  
сердечно-сосудистой системы 123

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**Степанов П. А., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В.** Визуализация  
технического состояния сложных объектов с помощью  
вычислительных моделей 132

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Содержание журнала «Информационно-управляющие системы»  
за 2017 г. [№ 1–6] 143

Сдано в набор 03.11.17. Подписано в печать 21.12.17. Формат 60×84/8.  
Гарнитура SchoolBookS. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 17,1. Уч.-изд. л. 23,5. Тираж 1000 экз (1-й завод 140 экз). Заказ № 530.  
Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.  
Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.  
Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить  
через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:  
№ 15385 — полугодовой индекс.

# ОРТОГОНАЛЬНЫЕ МАТРИЦЫ СИММЕТРИЧНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАДАЧ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**А. М. Сергеев**<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший преподаватель

**Н. Ш. Блаунштейн**<sup>б, в</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Негевский университет им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль

<sup>в</sup>Иерусалимский технологический институт, Иерусалим, Израиль

**Введение:** во многих задачах обработки и преобразования информации широкое применение находят матрицы с ортогональными столбцами (строками). Для разработчиков систем обработки изображений крайне важно иметь возможность простого выбора оптимального вида структурированных двухуровневых ортогональных матриц. **Цель исследования:** систематизация основных видов структурированных симметричных матриц Адамара, таких как циклические, негациклические, бициклические, четырехблочные и трехблочные в форме Пропус, которые можно использовать для обработки изображений в задачах сжатия, фильтрации и маскирования. **Результаты:** расширен базис матриц Адамара квазиортогональными матрицами Мерсенна нечетных порядков со свойствами симметрии. Выявлено, что матрицы Мерсенна и построенные с их помощью матрицы Адамара жестко связаны с числовыми последовательностями, для ряда из которых наблюдается сосуществование циклических, бициклических матриц, а также матриц в форме Пропус. Показано, что использование матриц Мерсенна в качестве «ядра» порождает матрицы Адамара новых симметричных структур, что расширяет классификацию симметричных ортогональных матриц. Приведены «портреты» ранее неизвестных симметричных матриц Адамара. **Практическая значимость:** полученные результаты дают более широкие возможности в выборе наиболее удачной матрицы для обработки конкретных изображений, в том числе изображений нестандартных размеров. Для всех рассмотренных матриц определено количество матричных фрагментов, достаточных для воспроизведения всей матрицы. Такие экономные представления симметричных матриц Адамара в памяти вычислителя позволяют увеличить эффективность процесса обработки изображений.

**Ключевые слова** — ортогональные матрицы, квазиортогональные матрицы, бициклические матрицы, матрицы Пропус, матрицы Адамара, матрицы Мерсенна, обработка изображений.

## Введение

В задачах обработки и преобразования информации широкое применение находят матрицы с ортогональными столбцами (строками). Такими, например, являются матрицы Адамара (**H**) [1] порядков 1, 2 и  $n = 4k$ , где  $k$  — натуральное число, с двумя значениями элементов (уровнями) {1, -1}. Для них справедливо равенство  $H_n^T H_n = nI$ , где  $I$  — единичная матрица. Привлекательность матриц Адамара состоит в том, что они имеют всего два значения элементов (два уровня) и алгоритмы вычисления с ними просто реализуемы.

К задачам цифровой обработки изображений с использованием ортогональных матриц относятся, в частности, фильтрация, сжатие, маскирование изображений и видеопоследовательностей, представляемых кадром [2–7].

В практике применения ортогональных матриц большое значение имеет максимальная простота их структуры, что во многом определяет затраты памяти для хранения матриц или время на их генерацию, если система обработки изображений предполагает такой способ получения матриц.

Среди возможных структур матриц Адамара выделяются симметричные, циклические, не-

гациклические, блочно-симметричные, в форме «ядро с окаймлением» и др.

В настоящей статье рассматриваются основные виды структурированных двухуровневых ортогональных матриц в целях обеспечения для разработчиков систем обработки изображений возможности простого выбора оптимальной из них.

## Структуры симметричных ортогональных матриц

Среди структур ортогональных матриц, относящихся к простейшим, можно выделить *симметричные*, обладающие рядом полезных свойств. Название связано с тем, что одинаковые элементы таких матриц расположены симметрично относительно главной диагонали. Для хранения таких матриц требуется  $(n^2 + n)/2$  их элементов.

Отметим, что умножение на симметричные матрицы требует меньше операционных затрат [8], поэтому симметрия в целом выгодна как при их хранении, так и при обработке изображений.

*Циклические симметричные* ортогональные матрицы представляют собой еще более простую структуру, задаваемую первой строкой  $n$  ее элементов. Все последующие строки получаются последовательным сдвигом предыдущей вправо с раз-

мещением вытесняемого элемента слева. Однако такое строгое ограничение для ортогональных матриц, согласно гипотезе Райзера [9], значительно лимитирует возможность их существования — последняя из циклических симметричных матриц Адамара имеет порядок 4. Очевидно, применение таких матриц весьма ограничено, а вопрос хранения или их вычисления не является для таких порядков принципиальным.

В общем случае циклическая матрица может быть симметрична относительно побочной диагонали. В ряде конструкций это свойство используется для получения симметричных матриц элементарным зеркальным отражением элементов относительно центральной осевой линии. Преимущество такой инверсии элементов очевидно: вместо  $(n^2 + n)/2$  элементов симметричной матрицы необходимо хранить лишь  $n$  элементов развернутого блока, который дает, помимо экономии памяти, еще и экономию при выполнении умножения на него.

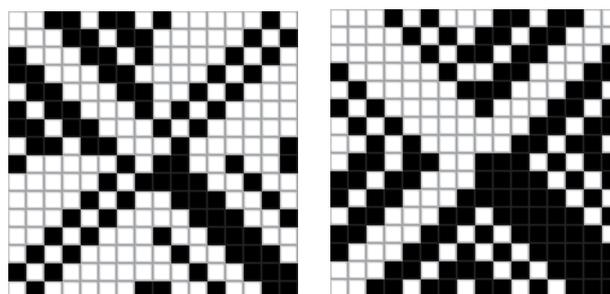
Единого алгоритма прямого построения симметричных матриц Адамара порядка  $n = 4k$  не существует. Наибольший интерес представляют симметричные матрицы Адамара в форме *блочно-симметричных* конструкций — матриц со сложными симметриями, состоящих из некоторого набора блоков (матриц меньшего порядка), не обязательно симметричных и ортогональных. Это широкий класс ортогональных матриц Адамара, алгоритмы вычисления которых базируются на схеме Пэли и ее модификациях [10], методе Сильвестра [11], четырехблочных массивах Вильямсона [12], методе Скарпи [13] и др. Указанные алгоритмы позволяют вычислять матрицы Адамара порядков общей последовательности  $4k$ , но различаемые по внешнему виду — их «портретам» [14], на которых два значения (уровня) элементов представлены клетками разного цвета.

*Бициклическая форма* характерна для матриц Адамара, получаемых из двух циклических блоков (матриц)  $A$  и  $B$  в виде

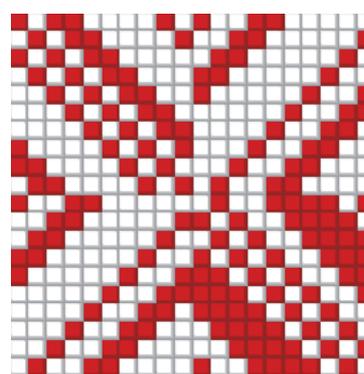
$$H = \begin{pmatrix} A & B \\ B^T & -A^T \end{pmatrix},$$

где  $B^T$  — транспонированная матрица  $B$ , а  $-A^T$  — транспонированная  $A$  с инверсными знаками элементов. Такие матрицы, являясь по конструкции блочно-симметричными, могут одновременно быть и симметричными (рис. 1).

В работе [15] сформулирована гипотеза, расширяющая гипотезу Райзера о существовании симметричных бициклических матриц Адамара порядков не выше 32-го. Для получения симметричных матриц в бициклической форме необходимо хранить только блоки  $A$  и  $B$ , что составит



■ *Рис. 1.* Матрицы Адамара  $H_{16}$  с симметричными блоками  
 ■ *Fig. 1.* Hadamard matrix  $H_{16}$  containing the symmetrical blocks



■ *Рис. 2.* Несимметричная матрица  $H_{20}$  в бициклической форме  
 ■ *Fig. 2.* Not symmetrical Matrix  $H_{20}$  in the bicyclic form

половину количества ее элементов  $2(n/2)^2$ , а в бициклической форме, не принимая во внимание симметрию, потребует только  $n$ .

В качестве примера на рис. 2 приведен портрет несимметричной матрицы  $H_{20}$  бициклической формы [16], хотя порядок ее меньше критического  $n = 32$ . Это подтверждает тот факт, что вращением блоков [15] не всегда можно добиться полной симметрии матрицы, даже если каждый блок сделать симметричным.

Двухблочную конструкцию обобщает четырехблочная, являющаяся комбинацией двух бициклических матриц с блоками  $A, B$  и  $C, D$  в виде массива Вильямсона:

$$H = \begin{pmatrix} A & B & C & D \\ -B & A & -D & C \\ -C & D & A & -B \\ -D & -C & B & A \end{pmatrix}.$$

Особенность симметричных четырехблочных конструкций заключается в том, что они могут

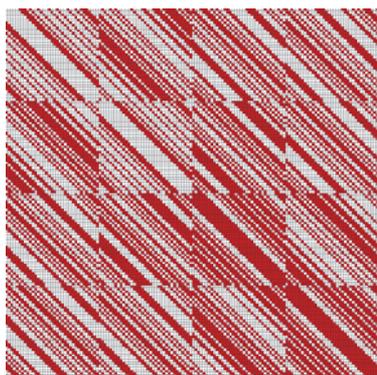
базироваться как на четырех симметричных, так и несимметричных блоках, дающих в результате симметричную матрицу Адамара. Из работы [17] следует, что не существует, например, симметричных матриц порядка 35 для массива Вильямсона, дающих матрицу  $H_{140}$ . Однако такая матрица может быть построена на основе четырех несимметричных циклических блоков. Ее портрет приведен на рис. 3. Для хранения таких симметричных матриц порядка  $n$ , если не принимать во внимание цикличность, потребуется  $n^2/4$  элементов. Минимальный объем в размере  $n^2/8$  элементов потребуется при построении матрицы на основе всех четырех симметричных блоков.

При равенстве блоков  $B$  и  $C$  симметричная конструкция матрицы Адамара строится на трех фактических блоках  $A$ ,  $B$  и  $D$ . Такие матрицы получили название *матриц Адамара в форме Пропус* ( $P$ ) [18, 19]. Эти матрицы могут быть реализованы в двух конфигурациях  $P_1$  и  $P_2$  [20], восходящих к перестановкам в массивах Вильямсона и Гетхальса — Зейделя, представленных в виде

$$P_1 = \begin{pmatrix} A & B=C & C=B & D \\ C & D & -A & -B \\ B & -A & -D & C \\ D & -C & B & -A \end{pmatrix};$$

$$P_2 = \begin{pmatrix} A & BR & CR & DR \\ CR & D^T R & -A & -B^T R \\ BR & -A & -D^T R & C^T R \\ DR & -C^T R & B^T R & -A \end{pmatrix}.$$

В отличие от массива Вильямсона, обладающего сходной конфигурацией, новый массив с симметричными блоками или одним симметричным блоком  $A$  в случае  $P_2$  всегда симметри-



■ *Рис. 3.* Симметричная матрица  $H_{140}$   
 ■ *Fig. 3.* Symmetrical matrix  $H_{140}$



■ *Рис. 4.* Симметричные матрицы  $H_{68}$  и  $H_{92}$  в форме Пропус  
 ■ *Fig. 4.* Symmetrical matrices  $H_{68}$  and  $H_{92}$  in the Propus form

чен, что обеспечивается реверсной единичной матрицей  $R$ .

Для получения матриц Адамара в форме Пропус необходимо хранить только по одной строке каждого из блоков  $A$ ,  $B$  и  $D$ , поскольку они циклически. В этом случае для воспроизведения матрицы Адамара в форме Пропус потребуется только  $3n/4$  элементов. При этом используется то обстоятельство, что реверс несимметричного циклического блока относительно центральной осевой линии (флип-инверсия) делает его симметричным (рис. 4).

Помимо циклических и бициклических форм блоков симметричных матриц, существует *негациклическая форма* [21, 22], отличающаяся от циклической лишь операцией инверсии знака размещаемых ниже диагонали элементов.

### Расширение базиса симметричных ортогональных матриц

Требования к качеству видеoinформации и ее разрешению постоянно возрастают — это является современной тенденцией, реализуемой как производителями видеоматриц, так и производителями матриц дисплеев. Если еще недавно требовалось обрабатывать кадры форматов PAL, SECAM и NTSC, то сегодня цифровой формат ультравысокой четкости UHD (Ultra High Definition) требует обработки кадров размеров  $3840 \times 2160$  (4K) и  $7680 \times 4320$  (8K). Появившаяся технология выделения на изображении или в кадре видеопоследовательности «окна качества» (Quality Box) и вовсе требует обработки кадров произвольного размера.

Указанные обстоятельства порождают необходимость для обработки изображений иметь широкий базис ортогональных матриц, включая матрицы не только больших размеров, неизвестных до настоящего времени, но и матрицы нечетных порядков [23].

Таким образом, кратко сформулировать требования к базису матриц можно в следующем виде:

— матрицы должны быть ортогональными для обеспечения симметричности процедур преобразования изображений;

— порядки матриц должны соответствовать возможно большему количеству чисел натурального ряда для того, чтобы можно было выбирать соответствующие матрицы (или кратно их использовать) для различных размеров изображений;

— для каждого порядка должно существовать более одной ортогональной матрицы;

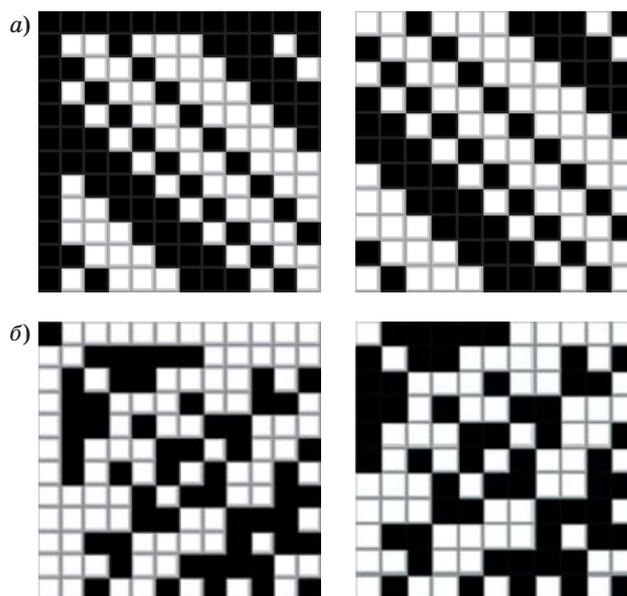
— количество возможных значений элементов (уровней) не должно превышать двух для оптимизации объема памяти для хранения матриц и упрощения вычислительных процедур.

Как отмечалось выше, существование матриц Адамара ограничено порядками  $4k$ , и это существенно ограничивает возможности их применения для изображений произвольного разрешения. Кроме того, отсутствует универсальный алгоритм их вычисления, а известные методы не позволяют найти матрицы Адамара всех порядков  $4k$ . Например, классические конструкции Пэли не позволяют найти матрицы Адамара порядков 92, 116, 156, 172, 184 и др.

Следует отметить, что в современных вычислительных средствах вычисления с плавающей точкой и в целых числах практически неразличимы по времени. Поэтому отход от требования целочисленности элементов ортогональных матриц, характерного для матриц Адамара, позволяет существенно расширить базис ортогональных матриц. Приведенным выше требованиям в полной мере отвечает базис квазиортогональных матриц, являющийся естественным обобщением матриц ортогональных.

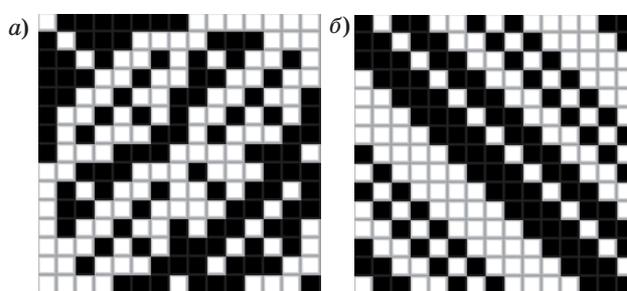
В работе [24] введена классификация квазиортогональных матриц, яркими представителями которых являются двухуровневые матрицы Адамара — Мерсенна ( $M$ ) нечетных порядков, имеющие, как и матрицы Адамара, два значения элементов  $\{1, -b\}$  [25]. В работе [26] сформулирована гипотеза о существовании таких матриц на всех порядках  $n = 4k - 1$ , соседствующих с порядками матриц Адамара  $4k$ . Однако в работах [27, 28] показано, что это не простое соседство, а матрицы Мерсенна являются ядром (core) матриц Адамара соответствующей конструкции (рис. 5, *a* и *b*), для получения которых достаточно ядро окаймить слева и сверху, а элементы  $-b$  заменить на  $-1$ .

Для матриц Мерсенна характерны не только методы поиска, как и для матриц Адамара, но также разнообразие их конструкций. На рис. 6, *a* и *b* показаны конструкции матриц  $M_{15}$ , найденные двумя характерными для поиска матриц Адамара ме-



■ Рис. 5. Матрица  $H_{12}$  на основе ядра — циклической матрицы  $M_{11}$  (*a*) и симметричной матрицы  $M_{11}$  (*b*)

■ Fig. 5. Matrix  $H_{12}$  on the basis of a core — a cyclic Matrix  $M_{11}$  (*a*) and the symmetrical matrix  $M_{11}$  (*b*)



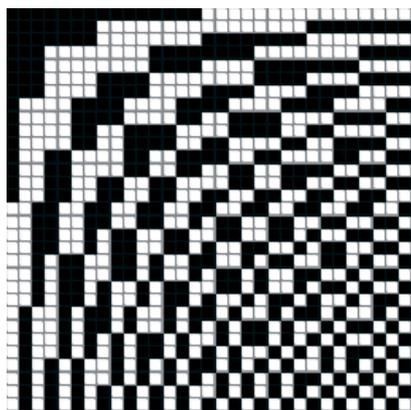
■ Рис. 6. Портреты матриц  $M_{15}$ , найденных методом Сильвестра (*a*) и Пэли (*b*)

■ Fig. 6. Portraits of matrixes of  $M_{15}$  found Silvester (*a*) and Paley (*b*) methods

тодами. Вторая матрица, как и матрица  $M_{11}$  на рис. 4, может быть сделана симметричной применением операции флип-инверсии, и в этом ее отличие от бициклической формы матрицы  $H_{20}$  (см. рис. 1).

Если порядок матрицы — степень простого числа, то матрица Мерсенна состоит из циклических блоков размеров, равных простому числу. В работе [29] приведено структурное исключение, подтверждающее общее правило: когда порядок  $n = 4k - 1$  равен произведению пар близких простых чисел, матрица Мерсенна будет циклической.

Особый интерес для отдельных задач обработки изображений представляют симметричные



■ *Рис. 7.* Матрица Мерсенна — Уолша  
 ■ *Fig. 7.* Mersenne — Walsh matrix

конструкции матриц Адамара — Уолша, получаемые из классических матриц Адамара путем упорядочивания столбцов по частоте (по количеству смены знаков их элементов). Однако упорядоченные матрицы Адамара — Уолша могут быть получены и из матриц Мерсенна — Уолша [7, 30] путем инвертирования знаков элементов и добавления каймы. На рис. 7 для примера приведен портрет матрицы Мерсенна — Уолша порядка 31, полученной упорядочиванием матрицы  $M_{31}$ .

## Литература

1. **Hadamard J.** Résolution d'une Question Relative aux Déterminants // *Bulletin des Sciences Mathématiques*. 1893. Vol. 17. P. 240–246.
2. **Horadam K. J.** Hadamard Matrices and their Applications. — Princeton, NJ: Princeton University Press, 2007. — 278 p.
3. **Balonin N., Sergeev M.** Construction of Transformation Basis for Video and Image Masking Procedures // *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. 2014. Vol. 262. P. 462–467. doi:10.3233/978-1-61499-405-3-462
4. **Balonin N., Sergeev M.** Expansion of the Orthogonal Basis in Video Comhression // *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. 2014. Vol. 262. P. 468–474. doi:10.3233/978-1-61499-405-3-468
5. **Востриков А. А., Мишура О. В., Сергеев А. М., Чернышев С. А.** О выборе матриц для процедур маскирования и демаскирования изображений // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2-24. С. 5335–5339.
6. **Vostrikov A., Sergeev M.** Expansion of the Quasi-orthogonal Basis to Mask Images // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2015. Vol. 40. P. 161–168. doi:10.1007/978-3-319-19830-9\_15
7. **Балонин Н. А., Балонин Ю. Н., Востриков А. А., Сергеев М. Б.** Вычисление матриц Мерсенна — Уолша // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2014. № 11 (125). С. 51–56.
8. **Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А.** Матрицы и вычисления. — М.: Наука, 1984. — 320 с.
9. **Ryser H. J.** Combinatorial Mathematics: The Carus Mathematical Monographs / Published by the Mathematical Association of America. — N. Y.: John Wiley and Sons, 1963. N 14. — 162 p.
10. **Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** Вычисление матриц Мерсенна методом Пэли // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57. № 10. С. 38–41.
11. **Sylvester J. J.** Thoughts on Inverse Orthogonal Matrices, Simultaneous Sign Successions, and Tessellated Pavements in Two or More Colours, with Applications to Newton's Rule, Ornamental Tile-Work, and the Theory of Numbers // *Philosophical Magazine*. 1867. Vol. 34. P. 461–475.
12. **Williamson J.** Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares // *Duke Math. J.* 1944. N 11. P. 65–81.
13. **Балонин Н. А., Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б.** Вычисление матриц Мерсенна и Адамара методом Скарпи // *Научно-технический вестник информа-*

## Заключение

Базис квазиортогональных матриц, используемых для обработки изображений, значительно шире ортогонального и включает его в себя. Это дает более широкие возможности в выборе наиболее удачной матрицы для обработки конкретных изображений, в том числе изображений нестандартных размеров.

Особенность двухуровневых квазиортогональных матриц состоит в том, что один из уровней иррационален, однако современные вычислительные возможности процессоров позволяют эффективно выполнять вычисления с ними, как и с матрицами Адамара.

Матрицы Мерсенна и построенные с их помощью матрицы Адамара жестко связаны с числовыми последовательностями, для ряда из которых наблюдается сосуществование циклических, бициклических матриц, а также матриц в форме Пропус, что обеспечивает простое и экономное их хранение. Принадлежность порядка матриц Мерсенна к множеству простых чисел регламентирует простоту структуры матрицы.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ при проведении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2.2200.2017/4.6.

- ционных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 103–111.
14. La Conjecture De Hadamard (I). <http://images.math.cnrs.fr/La-conjecture-de-Hadamard-I.html?lang=fr> (дата обращения: 17.08.2017).
15. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Расширение гипотезы Райзера на двуциклические структуры и разрешимость матриц Адамара орнаментом в виде бицикла с двойной каймой // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1. С. 2–10. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.2
16. Balonin N. A., Djokovic D. Z., Mironovskiy L. A., Seberry J., Sergeev M. B. Hadamard-type Matrices Cretan Matrices, Local Maximum Determinant Matrices. <http://mathscinet.ru> (дата обращения: 20.09.2017).
17. Djokovic D. Z. Good Matrices of Orders 33, 35 and 127 // JCMCC. 1993. N 14. P. 145–152.
18. Seberry J. and Balonin N. The Propus Construction for Symmetric Hadamard Matrices. <https://arxiv.org/abs/1512.01732> (дата обращения: 20.09.2017).
19. Di Matteo O., Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Symmetric Hadamard Matrices of Order 116 and 172 Exist // Special Matrices. 2015. Vol. 3.1. P. 227–234.
20. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы Пропус 92 и 116 // Информационно-управляющие системы. 2016. № 2. С. 101–103. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.101
21. Балонин Н. А., Джокович Д. Негапериодические пары Голея и матрицы Адамара // Информационно-управляющие системы. 2015. № 5. С. 2–17. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.2
22. Балонин Ю. Н., Егорова И. С., Сергеев А. М. Негапериодические матрицы и фильтры Мерсенна // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 11(149). С. 20–24.
23. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. О расширении ортогонального базиса в задачах сжатия видеоизображений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 2. С. 11–18.
24. Сергеев А. М. Обобщенные матрицы Мерсенна и гипотеза Балонины // Автоматика и вычислительная техника. 2014. № 4. С. 35–43.
25. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара — Мерсенна // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5. С. 92–94.
26. Балонин Н. А. О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 89–90.
27. Балонин Ю. Н., Востриков А. А., Сергеев А. М., Егорова И. С. О взаимосвязях квазиортогональных матриц, построенных на известных последовательностях чисел // Тр. СПИИРАН. 2017. № 1(50). С. 209–223. doi:<http://dx.doi.org/10.15622/sp.50.9>
28. Сергеев А. М. О взаимосвязи одного вида квазиортогональных матриц, построенных на порядках последовательностей  $4k$  и  $4k-1$  // Изв. ЛЭТИ. 2017. № 7. С. 12–17.
29. Hall M. A Survey of Difference Sets // Proc. Amer. Math. Soc. 1956. Vol. 7. P. 975–986.
30. Балонин Ю. Н., Сергеев А. М., Егорова И. С. Фильтры Мерсенна–Уолша для видеоданных в IP-сетях // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр./ Санкт-Петербургское общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления. 2016. Вып. 2. С. 367–371.

UDC 004.67

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.2

**Orthogonal Matrices with Symmetrical Structures for Image Processing**Sergeev A. M.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Lecturer, asklab@mail.ruBlaunstein N. Sh.<sup>b,c</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, nathan.blaunstein@hotmail.com<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Ben-Gurion University of the Negev, POB 653, 1, Ben Gurion St., Beer Sheva, 84105, Israel<sup>c</sup>Jerusalem College of Technology — Lev Academic Center, 21 Havaad Haleumi, POB. 16031, Jerusalem, 91160, Israel

**Introduction:** Matrices with orthogonal columns (rows) are widely used in many problems of information processing and transformation. It is extremely important for image processing system developers to be able to easily choose the optimal type of structured two-level orthogonal matrices. **Purpose:** Systematizing the main types of structured symmetric Hadamard matrices, such as cyclic, non-cyclic, bicyclic, four-block and three-block in the form of Propus, which can be used for image processing in compression, filtration and masking issues. **Results:** An extended classification of symmetric Hadamard matrices is proposed. It is revealed that Mersenne matrices and Hadamard matrices constructed with their help are rigidly linked to numerical sequences for some of which there is a co-existence of cyclic and bicyclic matrices, as well as of Propus matrices. It is shown that Mersenne matrices implemented as a «core» lead to Hadamard matrices of new symmetric structures, thus expanding the classification of symmetric orthogonal matrices. «Portraits» of previously unknown symmetric Hadamard matrices are presented. **Practical relevance:** The obtained results provide more opportunities in choosing the most suitable matrix to process particular images, including images of non-standard sizes. For each matrix under discussion, we have determined the number of its fragments sufficient to reproduce the entire matrix. Such effective representations of symmetric Hadamard matrices stored in a computer memory allow you to make image processing more efficient.

**Keywords** — Orthogonal Matrices, Quasi-Orthogonal Matrices, Bicyclic Matrices, Propus Matrices, Hadamard Matrices, Mersenne Matrices, Image Processing.

## References

1. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
2. Horadam K. J. *Hadamard Matrices and their Applications*. Princeton, NJ, Princeton University Press, 2007. 278 p.
3. Balonin N., Sergeev M. Construction of Transformation Basis for Video and Image Masking Procedures. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 2014, vol. 262, pp. 462–467. doi:10.3233/978-1-61499-405-3-462
4. Balonin N., Sergeev M. Expansion of the Orthogonal Basis in Video Compression. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 2014, vol. 262, pp. 468–474. doi:10.3233/978-1-61499-405-3-468
5. Vostrikov A. A., Mishura O. V., Sergeev A. M., Chernyshev S. A. The Choice of Matrices for Images Masking and Demasking Procedures. *Fundamental'nye issledovaniia* [Fundamental Research], 2015, no. 2-24, pp. 5335–5339 (In Russian).
6. Vostrikov A., Sergeev M. Expansion of the Quasi-orthogonal Basis to Mask Images. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2015, vol. 40, pp. 161–168. doi:10.1007/978-3-319-19830-9\_15
7. Balonin N. A., Balonin Yu. N., Vostrikov A. A., Sergeev M. B. Computation of Mersenne — Walsh Matrices. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of Computer and Information Technologies], 2014, no. 11 (125), pp. 51–56 (In Russian).
8. Voevodin V. V., Kuznetsov Yu. A. *Matritsy i vychisleniia* [Matrices and Calculations]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 320 p. (In Russian).
9. Ryser H. J. *Combinatorial Mathematics: The Carus Mathematical Monographs*. Published by the Mathematical Association of America. N. Y., John Wiley and Sons, 1963, no. 14. 162 p.
10. Balonin N. A., Sergeev M. B. Calculation of Mersenne Matrices by Paley Method. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2014, vol. 57, no. 10, pp. 38–41 (In Russian).
11. Sylvester J. J. Thoughts on Inverse Orthogonal Matrices, Simultaneous Sign Successions, and Tessellated Pavements in Two or More Colours, with Applications to Newton's Rule, Ornamental Tile-Work, and the Theory of Numbers. *Philosophical Magazine*, 1867, vol. 34, pp. 461–475.
12. Williamson J. Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares. *Duke Math. J.*, 1944, no. 11, pp. 65–81.
13. Balonin N. A., Balonin Y. N., Sergeev M. B. Mersenne and Hadamard Matrices Calculation by Scarpis Method. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014, no. 3 (91), pp. 103–111 (In Russian).
14. *La Conjecture De Hadamard (I)*. Available at: <http://images.math.cnrs.fr/La-conjecture-de-Hadamard-I.html?lang=fr> (accessed 17 August 2017).
15. Balonin N. A., Sergeev M. B. Ryser's Conjecture Expansion for Birculant Structures and Hadamard Matrix Resolvability by Double-Border Bicycle Ornament. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 2–10 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.2
16. Balonin N. A., Djokovic D. Z., Mironovskiy L. A., Seberry J., Sergeev M. B. *Hadamard-type Matrices Cretan Matrices, Local Maximum Determinant Matrices*. Available at: <http://mathscinet.ru> (accessed 20 September 2017).
17. Djokovic D. Z. Good Matrices of Orders 33, 35 and 127. *JCMCC*, 1993, no. 14, pp. 145–152.
18. Seberry J. and Balonin N. *The Propus Construction for Symmetric Hadamard Matrices*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1512.01732> (accessed 20 September 2017).
19. Di Matteo O., Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Symmetric Hadamard Matrices of Order 116 and 172 Exist. *Special Matrices*, 2015, vol. 3.1, pp. 227–234.
20. Balonin N. A., Sergeev M. B. Propus Matrices 92 and 116. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 2, pp. 101–103 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.101
21. Balonin N. A., Djokovic D. Negaperiodic Golay Pairs and Hadamard Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 5, pp. 2–17 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.2
22. Balonin Yu. N., Egorova I. S., Sergeev A. M. Negacirculant Mersenne Matrices and Filters. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of Computer and Information Technologies], 2016, no. 11(149), pp. 20–24 (In Russian).
23. Balonin N. A., Sergeev M. B. Expansion of the Orthogonal basis in Video Compression. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of Computer and Information Technologies], 2014, no. 2, pp. 11–18 (In Russian).
24. Sergeev A. M. Generalized Mersenne Matrices and Balonin's Conjecture. *Avtomatika i vychislitel'naiia tekhnika* [Automatic Control and Computer Sciences], 2014, no. 4, pp. 35–43 (In Russian).
25. Balonin N. A., Sergeev M. B., Mironovsky L. A. Calculation of Hadamard — Mersenne Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 5, pp. 92–94 (In Russian).
26. Balonin N. A. Existence of Mersenne Matrices of 11th and 19th Orders. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 2, pp. 89–90 (In Russian).
27. Balonin Yu. N., Vostrikov A. A., Sergeev A. M., Egorova I. S. On Relationships among Quasi-Orthogonal Matrices Constructed on the Known Sequences of Prime Numbers. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2017, no. 1 (50), pp. 209–223 (In Russian). doi: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.50.9>
28. Sergeev A. M. The Interconnection of one Kind of Quasi-Orthogonal Matrices Built on the Orders of the Sequences  $4k$  and  $4k-1$ . *Izvestiia "LETT"*, 2017, no. 7, pp. 12–17 (In Russian).
29. Hall M. A Survey of Difference Sets. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 1956, no. 7, pp. 975–986.
30. Balonin Yu. N., Sergeev A. M., Egorova I. S. Mersenne-Filters for Walsh Video in IP-Networks. *Sbornic trudov "Regional'naiia informatika i informatsionnaia bezopasnost'"* [Proc. "Regional Informatics and Information Security"], 2016, iss. 2, pp. 367–371 (In Russian).

## АНАЛИЗ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ МЕТОДОМ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ

А. Ю. Кучмин<sup>а</sup>, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник  
<sup>а</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** современные тенденции при решении задач условной оптимизации заключаются в эффективном применении методов, использующих анализ ограничений и построение области допустимых решений. Ограничения в большинстве случаев аппроксимируют кусочно-полиномиальными моделями и моделями в виде рациональных дробей. **Цель исследования:** разработка новых методов и алгоритмов анализа кусочно-полиномиальных ограничений для метода многомерных оболочек. **Результаты:** предложен метод разбиения систем кусочно-полиномиальных ограничений и ограничений в виде рациональных дробей на группы систем линейных ограничений с использованием дерева решений. Это позволяет свести исходную задачу к набору взаимосвязанных подзадач с линейными ограничениями, формирующими выпуклые многомерные оболочки, что существенно облегчает нахождение экстремумов. Эффективность метода подтверждена расчетом законов управления контррефлектором радиотелескопа. **Практическая значимость:** предложенный метод может быть использован для решения задач условной оптимизации с произвольными ограничениями и целевыми функциями в виде метрик, позволяющими полиномиальные аппроксимации и аппроксимации в виде рациональных дробей.

**Ключевые слова** — нелинейное программирование, многопараметрическая оптимизация, полиномы, рациональные дроби.

### Введение

В предыдущей статье [1] был подробно описан метод нелинейного программирования — метод многомерных оболочек, который использует как необходимые, так и достаточные условия оптимальности для целевых функций, имеющих вид метрик. Показано, что если единственный минимум (максимум) метрики находится вне области допустимых значений, образованной ограничениями, то решение задачи будет находиться на границе области допустимых решений. Тогда задача может иметь несколько решений, которые будут соответствовать одинаковым минимальным (максимальным) значениям целевой функции, и все эти решения могут быть получены методом многомерных оболочек. Основой этого метода является построение области допустимых решений путем анализа ограничений произвольного вида и их аппроксимации кусочно-полиномиальными ограничениями или рациональными дробями, что позволяет свести исходную задачу к набору взаимосвязанных подзадач с линейными ограничениями [2, 3], формирующими выпуклые многомерные оболочки, что существенно сужает область поиска.

Настоящая статья посвящена анализу полиномиальных ограничений и ограничений в виде рациональных дробей с использованием метода дерева решений, позволяющего свести подобные ограничения к эквивалентным системам линейных неравенств, равенств и систем уравнений, описывающих особые точки рациональных дробей, которые соответствуют корням их знаменателей.

### Анализ полиномиальных ограничений типа равенство

Рассмотрим случай систем ограничений треугольного вида

$$\begin{cases} v_1^{m_1} + \varphi_1(v_1, v_2, \dots, v_k) = 0 \\ v_2^{m_2} + \varphi_2(v_2, v_3, \dots, v_k) = 0; \\ \dots \\ v_k^{m_k} + \varphi_k(v_k) = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{T}_v \mathbf{x} + \mathbf{B}_v, \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T, k \leq n, \quad (1)$$

где  $m_1, m_2, \dots, m_k$  — степени соответствующих переменных;  $k$  — количество уравнений;  $\varphi_i$  — полиномы от переменных  $v_i, \dots, v_k$ , причем показатели при переменной  $v_i$  в многочлене  $\varphi_i$  меньше, чем  $m_i$ ;  $\mathbf{T}_v, \mathbf{B}_v$  — матрицы параметров;  $n$  — размерность вектора  $\mathbf{x}$ .

Наиболее простой способ разбиения системы исходных ограничений может быть выполнен с помощью метода деревьев решений [4], который применимо к (1) используется следующим образом.

Слою 1 дерева соответствует уравнение  $k$  в (1), в которое входит только  $v_k$ . Используя алгоритмы из работы [5], находим корни полинома одной переменной уравнения  $k$ . Каждому узлу слоя соответствует вещественный корень  $\lambda_{i_1}$  полинома уравнения  $k$ .

Слой 2 соответствует уравнению  $k-1$  в (1). Выбирается родительский узел в слое 1, и связанный с ним корень подставляется в уравнение

$k - 1$ , которое после замены станет зависеть от переменной  $v_{k-1}$ . Аналогично слою 1 рассчитываются вещественные корни  $\lambda_{i_1, i_2}$  для полученного уравнения  $k - 1$  одной переменной. Эта процедура выполняется для всех родительских узлов. Все вещественные корни  $\lambda_{i_1, i_2}$  являются узлами слоя 2, и будут родительскими для следующего слоя, и должны быть подставлены в следующее уравнение.

Построение дерева будет происходить до слоя  $k$  включительно. Число индексов узла равно номеру слоя. Номер текущего узла составляется из номера родительского узла и порядкового номера потомка. Если рост дерева завершился раньше слоя  $k$ , то это означает, что система ограничений несовместна.

Число эквивалентных систем линейных ограничений типа равенство, на которые разбиваются исходные уравнения (1), равно числу узлов в слое  $k$ . Эти системы формируются по номеру узла  $\lambda_{i_1, i_2, \dots, i_{k-1}, i_k}$  в слое  $k$  следующим образом:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{k-1} \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{i_1, i_2, \dots, i_{k-1}, i_k} \\ \lambda_{i_1, i_2, \dots, i_{k-1}} \\ \vdots \\ \lambda_{i_1, i_2} \\ \lambda_{i_1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $i_1, i_2, \dots, i_{k-1}, i_k$  — соответствующие индексы узлов в каждом слое.

### Анализ систем полиномиальных ограничений типа неравенство диагонального вида

Диагональными будем называть системы полиномиальных неравенств, которые путем линейной замены сводятся к виду

$$\begin{cases} a_1 v_1^{m_1} + \varphi_1(v_1) \leq 0 \\ a_2 v_2^{m_2} + \varphi_2(v_2) \leq 0; \\ \dots \\ a_k v_k^{m_k} + \varphi_k(v_k) \leq 0 \end{cases};$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{T}_v \mathbf{x} + \mathbf{B}_v, \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T, \quad (3)$$

где каждое неравенство зависит только от одной переменной  $v_i$ , а  $a_i$  — константы, которые принимают значения либо  $-1$ , либо  $1$  и определяют знак первого слагаемого в неравенстве с номером  $i$ .

По аналогии с ограничениями типа равенство разбиение системы исходных ограничений может быть выполнено с помощью метода деревьев

решений. Каждое неравенство может анализироваться отдельно, для него строится собственное дерево следующим образом.

1. Необходимо найти вещественные корни  $\lambda_{i,j}$  полинома  $v_i^{m_i} + \varphi_i(v_i) / a_i$ ,  $i$  — номер неравенства,  $j$  — номер вещественного корня полинома. Если вещественные корни отсутствуют, то необходимо проанализировать ограничение на непротиворечивость, рассмотрев знак  $a_i$ . Так, при  $a_i = -1$  неравенство справедливо при любых  $x$ , и его можно исключить, а при  $a_i = 1$  задача не имеет решения.

2. Построить произведение линейных сомножителей, которые образованы только вещественными корнями:  $a_i \prod_{j=1}^p (v_i - \lambda_{i,j}) \leq 0$ , где  $p$  — число

вещественных корней. Каждым сомножителем связать переменную  $u_j$ , которая может принимать значение  $1$  при  $v_i - \lambda_{i,j} \geq 0$  и значение, равное  $-1$ , при  $v_i - \lambda_{i,j} \leq 0$ . Для вершины дерева введем переменную  $u_0 = a_i$ . Таким образом, дерево имеет вид бинарного: одна ветвь определяет отрицательный переход, а другая — положительный. В узлах дерева будем хранить произведения соответствующих  $u_j$ . Нумерация узлов сквозная, по уровням слева направо. Построение дерева выполняется до уровня  $p + 1$  включительно.

3. В уровне  $p + 1$  выбираются узлы с отрицательными значениями. По номеру выбранного узла строится система линейных неравенств, для чего номер узла представляется в бинарном виде, удаляется старшая единица. Номер символа в бинарном коде  $j$  соответствует номеру линейного слагаемого  $v_i - \lambda_{i,j}$ , нулю соответствует неравенство  $v_i - \lambda_{i,j} \leq 0$ , а единице — слагаемое  $-v_i + \lambda_{i,j} \leq 0$ .

### Анализ систем полиномиальных ограничений типа неравенство произвольного вида

В общем случае анализ подобных ограничений является сложной задачей, рассмотренной в работах [5–8]. Следует отметить три основных подхода.

1. Разложение полиномов многих переменных на простые сомножители:

$$\begin{cases} a_1 \prod_i \prod_j (v_i - \lambda_{1,i,j}) \leq 0 \\ a_2 \prod_i \prod_j (v_i - \lambda_{2,i,j}) \leq 0; \\ \dots \\ a_s \prod_i \prod_j (v_i - \lambda_{s,i,j}) \leq 0 \end{cases};$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{T}_v \mathbf{x} + \mathbf{B}_v, \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T. \quad (4)$$

2. Переход от систем неравенств к системам уравнений путем введения дополнительных переменных [9]:

$$\begin{cases} a_1\varphi_1(v_1, v_2, \dots, v_k) - v_{k+1} = 0 \\ a_2\varphi_2(v_1, v_2, \dots, v_k) - v_{k+2} = 0 \\ \dots \\ a_k\varphi_k(v_1, v_2, \dots, v_k) - v_{2k} = 0 \quad ; \\ -v_{k+1} \leq 0 \\ \dots \\ -v_{2k} \leq 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{T}_v \mathbf{x} + \mathbf{B}_v, \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_{2k}]^T. \quad (5)$$

3. Применение методов интервального анализа. Данный подход удобно применять для систем ограничений треугольного вида степени не более 4:

$$\begin{cases} a_1 v_1^{m_1} + \varphi_1(v_1, v_2, \dots, v_k) \leq 0 \\ a_2 v_2^{m_2} + \varphi_2(v_2, v_3, \dots, v_k) \leq 0; \\ \dots \\ a_k v_k^{m_k} + \varphi_k(v_k) \leq 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{T}_v \mathbf{x} + \mathbf{B}_v, \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T, m_i \leq 4. \quad (6)$$

По аналогии с системами уравнений треугольного вида система (6) решается, начиная с неравенства номер  $k$ , для этого необходимо найти корни полинома не старше степени 4, что может быть выполнено по методу Феррари. В общем виде полиномиальное уравнение для  $v_k$  имеет вид

$$v_k^4 + av_k^3 + bv_k^2 + cv_k + d = 0,$$

$$a = \frac{a_{k,2}}{a_{k,1}}, b = \frac{a_{k,3}}{a_{k,1}}, c = \frac{a_{k,4}}{a_{k,1}}, d = \frac{a_{k,5}}{a_{k,1}}, \quad (7)$$

где  $a_{k,i}$  — коэффициенты исходного полинома. По методу Феррари он сводится к решению кубического уравнения

$$y^3 + b_1 y^2 + b_2 y + b_3 = 0,$$

$$b_1 = -b, b_2 = ac - 4d, b_3 = -a^2 d + 4bd - c^2. \quad (8)$$

С помощью формулы Кардано определяем вещественный корень

$$z = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}, \quad (9)$$

где  $p = -\frac{b_1^2}{3} + b_2$ ;  $q = \frac{2b_1^3}{27} - \frac{b_1 b_2}{3} + b_3$ . Значения кубических корней следует брать такими, чтобы их

произведение было равно  $-\frac{p}{3}$ . В итоге находим корни (8), учтя замену  $y_0 = z - \frac{b_1}{3}$ . Затем решаются два квадратных уравнения

$$v_k^2 + \frac{a}{2}v_k + \frac{y_0}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a^2}{4} - b + y_0\right)v_k^2 + \left(\frac{a}{2}y_0 - c\right)v_k + \frac{y_0^2}{4} - d} = 0, \quad (10)$$

в которых подкоренное выражение является полным квадратом:

$$v_k^2 + \frac{a}{2}v_k + \frac{y_0}{2} \pm \left(v_k - \frac{2c - ay_0}{a^2 - 4b + 4y_0}\right) = 0. \quad (11)$$

Корнями (7) будут корни

$$\lambda_{1,2} = -\frac{a+2}{4} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{2} + 1\right)^2 - 4\left(\frac{y_0}{2} - \frac{2c - ay_0}{a^2 - 4b + 4y_0}\right)};$$

$$\lambda_{3,4} = -\frac{a-2}{4} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{2} - 1\right)^2 - 4\left(\frac{y_0}{2} + \frac{2c - ay_0}{a^2 - 4b + 4y_0}\right)}. \quad (12)$$

Условия вещественности корней:

— для  $\lambda_{1,2}$

$$\left(\frac{a}{2} + 1\right)^2 - 4\left(\frac{y_0}{2} - \frac{2c - ay_0}{a^2 - 4b + 4y_0}\right) \geq 0;$$

— для  $\lambda_{3,4}$

$$\left(\frac{a}{2} - 1\right)^2 - 4\left(\frac{y_0}{2} + \frac{2c - ay_0}{a^2 - 4b + 4y_0}\right) \geq 0. \quad (13)$$

Выражения (7)–(13) дают возможность получить границы изменения вещественных корней с использованием интервальной арифметики в случае, когда параметры в (5) являются интервалами:

$$v_k^4 + av_k^3 + bv_k^2 + cv_k + d = 0,$$

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, b_{\min} \leq b \leq b_{\max},$$

$$c_{\min} \leq c \leq c_{\max}, d_{\min} \leq d \leq d_{\max}. \quad (14)$$

Каждый из описанных подходов для произвольного вида полиномиальных ограничений является трудоемким, в методе многомерных оболочек используется полиномиальное приближение произвольных ограничений, и поэтому зна-

чально удобно искать их аппроксимации в виде (4), для чего обобщим процедуру из предыдущего раздела.

1. Необходимо найти слагаемые с вещественными корнями  $\lambda_{s,i,j}$ , где  $s$  — номер неравенства;  $i$  — номер переменной  $v$ ;  $j$  — номер вещественного корня полинома. Если вещественные корни отсутствуют, то необходимо проанализировать ограничение на непротиворечивость, рассмотрев знак  $a_s$ . Так, при  $a_s = -1$  неравенство справедливо при любых  $x$ , и его можно исключить, а при  $a_i = 1$  задача не имеет решения.

2. Построить произведение линейных сомножителей, которые образованы только вещественными корнями:  $a_s \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^{p_i} (v_i - \lambda_{s,i,j}) \leq 0$ , где

$p_i$  — число вещественных корней для переменной  $v_i$ . Каждым сомножителем связать переменную  $u_j$ , которая может принимать значение 1 при  $v_i - \lambda_{i,j} \geq 0$  и значение, равное  $-1$ , при  $v_i - \lambda_{i,j} \leq 0$ . Для вершины дерева введем переменную  $u_0 = a_i$ . Таким образом, дерево имеет вид бинарного: одна ветвь определяет отрицательный переход, а другая — положительный. В узлах дерева будем хранить произведения соответствующих  $u_j$ . Нумерация узлов сквозная, по уровням слева направо. Построение дерева выполняется до уровня  $\sum_{i=1}^k p_i + 1$  включительно.

3. На уровне  $\sum_{i=1}^k p_i + 1$  выбираются узлы с отрицательными значениями. По номеру выбранного узла строится система линейных неравенств, для этого номер узла представляется в бинарном виде, удаляется старшая единица. Номер символа в бинарном коде  $m$  соответствует номеру линейного слагаемого  $v_i - \lambda_{s,i,j}$ , нулю соответствует неравенство  $v_i - \lambda_{s,i,j} \leq 0$ , а единице — слагаемое  $-v_i + \lambda_{s,i,j} \leq 0$ .

### Анализ систем ограничений типа неравенство, заданных в виде рациональных дробей

Рассмотрим случай ограничений с разрывами в особых точках. Одним из вариантов таких ограничений являются рациональные дроби. Случай систем подобных уравнений сводится к задаче решения систем полиномиальных уравнений, в результате которого находятся списки корней числителя и знаменателя, которые можно сформировать в системы линейных уравнений, как в первом разделе, и систем неравенств, которые определяют особые области.

Как и в предыдущем случае, аппроксимацию произвольных ограничений удобно искать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 \frac{\prod_i \prod_j (v_i - \lambda_{1,i,j})}{\prod_i \prod_l (v_i - \lambda_{1,i,l})} \leq 0 \\ a_2 \frac{\prod_i \prod_j (v_i - \lambda_{2,i,j})}{\prod_i \prod_l (v_i - \lambda_{2,i,l})} \leq 0; \\ \dots \\ a_s \frac{\prod_i \prod_j (v_i - \lambda_{s,i,j})}{\prod_i \prod_l (v_i - \lambda_{s,i,l})} \leq 0 \end{array} \right. ;$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{T}_v \mathbf{x} + \mathbf{B}_v, \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T. \quad (15)$$

Для этого случая можно изменить процедуру из предыдущего раздела.

1. Необходимо найти слагаемые с вещественными корнями  $\lambda_{s,i,j}$  и  $\lambda_{s,i,l}$ , где  $s$  — номер неравенства,  $i$  — номер переменной  $v$ ,  $j$  — номер вещественного корня полинома числителя,  $l$  — номер вещественного корня полинома знаменателя. Если вещественные корни отсутствуют, то необходимо проанализировать ограничение на непротиворечивость, рассмотрев знак  $a_s$ . Так, при  $a_s = -1$  неравенство справедливо при любых  $x$ , и его можно исключить, а при  $a_i = 1$  задача не имеет решения.

2. Построить дробь из линейных слагаемых, которые образованы только вещественными кор-

нями:  $a_s \frac{\prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^{n_i} (v_i - \lambda_{s,i,j})}{\prod_{i=1}^k \prod_{l=1}^{d_i} (v_i - \lambda_{s,i,l})} \leq 0$ , где  $n_i$  — число веще-

ственных корней числителя для переменной  $v_i$ ;  $d_i$  — число вещественных корней знаменателя для переменной  $v_i$ . С каждым сомножителем числителя и знаменателя нужно связать переменную  $u_j$ , которая может принимать значение 1 при  $v_i - \lambda_{i,j} \geq 0$  и значение, равное  $-1$ , при  $v_i - \lambda_{i,j} \leq 0$ . Для вершины дерева введем переменную  $u_0 = a_i$ . Таким образом, дерево имеет вид бинарного: одна ветвь определяет отрицательный переход, а другая — положительный. В узлах дерева будем хранить произведения соответствующих  $u_j$ . Нумерация узлов сквозная, по уровням слева направо. Построение дерева выполняется до уровня

$\sum_{i=1}^k (n_i + d_i) + 1$  включительно.

3. На уровне  $\sum_{i=1}^k (n_i + d_i) + 1$  выбираются узлы с отрицательными значениями. По номеру вы-

бранного узла строится система линейных неравенств, для этого номер узла представляется в бинарном виде, удаляется старшая единица. Номер символа в бинарном коде  $m$  соответствует номеру линейного слагаемого  $v_i - \lambda_{s,i,j}$  или  $v_i - \lambda_{s,i,l}$ , нулю соответствует неравенство  $v_i - \lambda_{s,i,j} \leq 0$  или  $v_i - \lambda_{s,i,l} \leq 0$ , а единице — слагаемое  $-v_i + \lambda_{s,i,j} \leq 0$  или  $-v_i + \lambda_{s,i,l} \leq 0$ .

4. Вещественные корни знаменателя формируют особые области  $v_i - \lambda_{s,i,l} = 0$ , которые удобно представить в виде двух строгих неравенств, формирующих разбиение на несколько независимых областей:

$$v_i - \lambda_{s,i,l} < 0, \quad v_i - \lambda_{s,i,l} > 0. \quad (16)$$

Точки особых областей также должны быть проверены как кандидаты на оптимальные решения. Для вычислительных процедур удобнее использовать при заданной точности вычислений аналог выражению

$$v_i - \lambda_{s,i,l} + \varepsilon \leq 0, \quad v_i - \lambda_{s,i,l} - \varepsilon \geq 0, \quad (17)$$

где  $\varepsilon$  — погрешность расчетов.

### Нахождение оптимальной траектории исполнительного механизма контррефлектора радиотелескопа

В качестве примера использования метода многомерных оболочек покажем, как задача нелинейной оптимизации может быть сведена к последовательности задач линейного программирования при численном расчете. Задача управления исполнительным механизмом контррефлектора радиотелескопа была подробно описана в работе [10]:

$$J = \min_{x_1} \{x_1\} \quad (18)$$

при ограничениях

- 1)  $x_1 > k_1 T_h$ ;
- 2)  $g_i(x_1) > \frac{k_2}{T_h}$ ;
- 3)  $\mu_i(x_1) > 0$ ;
- 4)  $\mu_i(x_1) - \mu_i(x_1) \ln \mu_i(x_1) - \sigma_i < 0$ ;
- 5)  $-v_i^{\max} < \frac{-a_i}{T_h - \frac{1}{g_i(x_1)}} \left( e^{\frac{-h_i(x_1)}{T_h}} - e^{-h_i(x_1)g_i(x_1)} \right) < v_i^{\max}$ ;

$$6) -\lambda_i^{\max} < \frac{-a_i}{T_h} g_i(x_1) < \lambda_i^{\max},$$

где  $x_1$  — время переходного процесса;  $k_1, k_2, T_h, a_i$  — постоянные параметры;  $v_i^{\max}, \lambda_i^{\max}$  — максимальные значения скоростей и ускорений соответственно;

$$\mu_i = \frac{\text{sign}(a_i)\delta_i}{a_i x_1} - \frac{T_h}{x_1} e^{\frac{-x_1}{T_h}}, \quad \sigma_i = \frac{\text{sign}(a_i)\delta_i}{a_i},$$

$$\frac{\sigma_i}{\mu_i(x_1)x_1} + \frac{1}{x_1} f^{-1} \left( -\frac{1}{\mu_i(x_1)} e^{\frac{\sigma_i}{\mu_i(x_1)}} \right) = g_i(x_1),$$

$$\frac{1}{T_h - g_i(x_1)} \ln \left( \frac{1}{T_h g_i(x_1)} \right) = h_i(x_1); \quad \delta_i — \text{ошибка}$$

управления;  $f^{-1}$  — функция Ламберта.

Ограничения в (18) могут быть аппроксимированы на интервале  $0 \leq x_1 \leq k_1 T_h$  дробями, показатели полиномов числителей и знаменателей которых не превышают 4. Тогда, исходя из рассмотренного выше материала, можно представить подобного вида ограничения эквивалентными системами линейных неравенств и равенств от одной переменной  $x_1$ . Такая задача может быть описана как интервальная и приводит к нахождению верхней и нижней оценок для  $x_1$ . Решением задачи максимального быстродействия будет нижняя оценка для  $x_1$ .

### Заключение

Рассмотрены вопросы анализа ограничений для решения современных задач условной оптимизации. Разработаны алгоритмы для анализа кусочно-полиномиальных ограничений и ограничений в виде рациональных дробей для метода многомерных оболочек [1] с использованием метода деревьев решений. Это позволяет свести системы полиномиальных ограничений или ограничений в виде рациональных дробей к эквивалентным системам линейных равенств и неравенств. Показано, что данный подход эффективен при расчете траекторий движения исполнительного механизма контррефлектора радиотелескопа, так как они сводятся к интервальным задачам от одной переменной, а именно времени переходного процесса. Подобные алгоритмы позволяют с применением простых минимаксных процедур найти решение задачи либо убедиться, что при данных исходных значениях параметров задача не имеет решения.

## Литература

1. Кучмин А. Ю. Об одном методе нелинейного программирования с произвольными ограничениями // Информационно-управляющие системы. 2016. № 2. С. 2–10. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.2
2. Motzkin T., Raiffa H., Thompson G., Thrall R. M. The Double Description Method // Contributions to the Theory of Games. — Princeton: Princeton University Press, 1953. — Pp. 51–73.
3. Шевченко В. Н., Груздев Д. В. Модификация алгоритма Фурье — Мотскина для построения триангуляции // Дискретный анализ и исследование операций. 2003. Т. 10. № 1. С. 53–64.
4. Lantz Brett. Machine Learning with R. 2nd ed. — Packt Publishing, 2015. — 454 p.
5. Бухбергер Б. и др. Компьютерная алгебра. Символьные и алгебраические вычисления / пер. с англ.; под ред. Б. Бухбергера, Дж. Коллинза, Р. Лооса. — М.: Мир, 1986. — 392 с.
6. Дэвенпорт Дж., Сирэ И., Турнье Э. Компьютерная алгебра. — М.: Мир, 1991. — 352 с.
7. Кокс Д., Литл Дж., О’Ши Д. Идеалы, многообразия и алгоритмы. Введение в вычислительные аспекты алгебраической геометрии и коммутативной алгебры/пер. с англ. — М.: Мир, 2000. — 687 с.
8. Перминова М. Ю., Кручинин В. В., Кручинин Д. В. Алгоритм декомпозиции полиномов, основанный на разбиениях // Докл. ТУСУР. 2015. № 4 (38). С. 102–107.
9. Зангвилл У. И. Нелинейное программирование. Единый подход / пер. с англ. — М.: Сов. радио, 1973. — 312 с.
10. Артеменко Ю. Н., Агапов В. А., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 2–9.

UDC 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.9

## Analysis of Polynomial Restrictions using Decision Tree Method

Kuchmin A. Yu.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, radiotelescope@yandex.ru<sup>a</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol’shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The current trend in solving conditional optimization problems is to effectively use the analysis of restrictions in order to create an area of admissible decisions. The restrictions are usually approximated piecewise by polynomial or rational fraction models. **Purpose:** The method of multidimensional covers needs new methods and algorithms to be developed for the analysis of piecewise and polynomial restrictions. **Results:** A method is proposed for the analysis of piecewise and polynomial restrictions as well as restrictions in the form of rational fractions. Their systems are decomposed into groups of linear restriction systems using a tree of decisions. This reduces the initial problem to a set of interconnected subproblems with linear restrictions forming convex multidimensional covers. This considerably facilitates finding the extrema. The efficiency of the method is confirmed by the calculation of radio telescope counter-reflector control rules. **Practical relevance:** The proposed method can be used to solve problems of conditional optimization with random restrictions and criterion functions in the form of metrics which enable polynomial approximations and approximations in the form of rational fractions.

**Keywords** — Nonlinear Programming, Multiple Parameter Optimization, Polynoms, Rational Fractions.

## References

1. Kuchmin A. Yu. A Nonlinear Programming Method with Arbitrary Restrictions. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 2, pp. 2–10 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.2
2. Motzkin T., Raiffa H., Thompson G., Thrall R. M. The Double Description Method. In: *Contributions to the Theory of Games*. Princeton, Princeton University Press, 1953. Pp. 51–73.
3. Shevchenko V. N., Gruzdev D. V. Modification of Algorithm of Fourier — Motzkin for Creation of a Triangulation. *Diskretnyi analiz i issledovanie operatsii*, 2003, vol. 10, no. 1, pp. 53–64 (In Russian).
4. Lantz Brett. *Machine Learning with R*. 2nd ed. Packt Publishing, 2015. 454 p.
5. *Computer Algebra: Symbolic and Algebraic Computation*. Ed. by B. Buchberger, G. Collins, R. Loos. Wien, New York, Springer-Verlag, 1983. 291 p.
6. Davenport J., Siret Y., Tournier E. *Computer Algebra: Systems and Algorithms for Algebraic Computation*. 2nd ed. London, Academic Press, 1993. 313 p.
7. Cox D., Little J., O’Shea D. *Ideals, Varieties, and Algorithms: An Introduction to Computational Algebraic Geometry and Commutative Algebra*. 2nd ed. Springer, 2006. 551 p.
8. Perminova M. Yu., Kruchinin V. V., Kruchinin D. V. Algorithm for Decomposition of Polynomials Based on Partitions. *Doklady TUSUR*, 2015, no. 4 (38), pp. 102–107 (In Russian).
9. Zangwill W. I. *Nonlinear Programming. A Unified Approach*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1969. 312 p.
10. Artemenko Yu. N., Agapov V. A., Dubarenko V. V., Kuchmin A. Yu. Co-operative Control of Subdish Actuators of Radio-Telescope. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 4, pp. 2–9 (In Russian).

УДК 621.391.26

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.15

# АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУТОНОВОГО КОМПЛЕКСИРОВАННОГО МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ-ЭТАЛОНА

**В. В. Неретина<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

**В. Н. Ефанов<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, РФ

**Постановка проблемы:** многоспектральные авиационные системы технического зрения находят все более широкое применение для оптико-электронной разведки, для повышения осведомленности экипажей мобильной техники, при управлении в сложных погодных условиях. Объединение информации от разнотипных монохромных сенсоров осуществляется с помощью специальных алгоритмов комплексирования. Однако большинство существующих алгоритмов комплексирования оказывается чувствительным к помехам видеоданных вследствие ограниченных динамических диапазонов свето- и цветопередачи, ошибок калибровочных характеристик и временных привязок потока видеоданных. **Цель исследования:** разработка алгоритма, обеспечивающего структурную устойчивость решения задачи комплексирования многоспектральных изображений на множестве возможных фотометрических ситуаций. **Результаты:** выполнен обзор методов комплексирования полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений с формированием полутонового результата и в псевдоцветах. Рассмотрен глобальный метод «переноса» цвета с изображения-эталона. Разработан алгоритм вычисления цветных характеристик полутонового комплексированного многоспектрального изображения на основе кластеризации изображения-эталона, включающий: полутоновое комплексирование для формирования яркостной компоненты итогового кадра, преобразование изображения-эталона из цветового пространства RGB в пространство YIQ, цветовую сегментацию изображения-эталона в пространстве YIQ с помощью алгоритма кластеризации по математическому ожиданию, поиск для каждого пикселя исходного изображения кластера с наиболее близким значением яркости и присвоение значений цветовой информации кластера хроматическим компонентам пикселя, преобразование полученного цветного комплексированного изображения из цветового пространства YIQ в пространство RGB. На конкретных примерах обработки изображений в среде MatLab доказана эффективность разработанного алгоритма по сравнению с существующими глобальными методами комплексирования. **Практическая значимость:** по результатам анализа нормированных гистограмм предложенный алгоритм вычисления цветных характеристик обеспечивает более высокое качество определения цветовой информации по сравнению с методом «переноса» цвета с изображения-эталона.

**Ключевые слова** — многоспектральные системы технического зрения, цветовые пространства RGB и YIQ, комплексирование изображений, алгоритмы кластеризации.

## Введение

Многоспектральные авиационные системы технического зрения находят все более широкое применение при решении задач пилотирования летательных аппаратов (ЛА) в условиях ограниченной видимости, ночью, при неблагоприятных погодных и природных условиях, а также при дистанционном зондировании поверхности Земли, в том числе для обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Наряду с этим многоспектральные изображения используются и в других отраслях, в частности, в жилищно-коммунальном хозяйстве для анализа состояния подземных и надземных тепловых коммуникаций, при оценке тепловой эффективности зданий и поиске мест утечки тепла.

Для формирования многоспектральных изображений на борту ЛА в состав пассивных каналов технического зрения должны входить: телевизионные (ТВ) датчики видимого диапазона длин волн (380–760 нм), тепловизионные (ТПВ) датчики

коротковолнового (0,9–1,7 мкм), средневолнового (3–5 мкм) или длинноволнового (8–14 мкм) инфракрасных диапазонов. Объединение информации от разнотипных монохромных сенсоров осуществляется с помощью специальных алгоритмов комплексирования, позволяющих получать реалистичные изображения с повышенной четкостью изображения, резкой текстурой и качественной передачей оттенков, что значительно увеличивает разрешающую способность дисплея и интенсивность воспроизведения полномасштабных визуальных картин. В результате многоспектральное изображение имеет большую информативность, чем изображение, полученные от каждого из каналов системы технического зрения в отдельности [1–5].

Однако большинство существующих алгоритмов комплексирования оказывается чувствительным к помехам, содержащимся в видеоданных вследствие ограниченных динамических диапазонов свето- и цветопередачи, а также связанным с ошибками калибровочных характеристик и временных привязок потока видеоданных.

В данной работе предлагается алгоритм, обеспечивающий структурную устойчивость решения задачи комплексирования многоспектральных изображений на множестве возможных фотометрических ситуаций.

### Обзор методов комплексирования полутоновых изображений.

#### Метод «переноса» цвета с изображения-эталона

На практике используются два основных подхода к комплексированию изображений [3–12]:

— комплексирование полутоновых изображений двух спектральных диапазонов (ТВ и ТПВ) с формированием высококонтрастного полутонового результата;

— комплексирование полутоновых изображений с использованием методов ложных цветов с последующим приведением к гамме естественных цветов.

В рамках первого подхода можно выделить следующие методы [3, 5]:

— метод равновесного суммирования (алгоритм среднего арифметического):

$$Y_{fus}(i, j) = 0,5(TV(i, j) + IR(i, j)), \quad (1)$$

где  $Y_{fus}(i, j)$  — яркость пикселя комплексированного изображения;  $TV(i, j)$ ,  $IR(i, j)$  — яркости пикселей с координатами  $i$  и  $j$  монохромных ТВ- и ТПВ-изображений соответственно;

— метод комплексирования с приоритетом ТВ-канала:

$$Y_{fus}(i, j) = TV(i, j) + |IR(i, j) - \overline{IR}| - \overline{\Delta IR}, \quad (2)$$

где  $\overline{IR}$  — среднее значение яркости ТПВ-изображения;  $\overline{\Delta IR} = |IR(i, j) - \overline{IR}|$  — среднее значение абсолютных разностей яркости ТПВ-изображения;

— метод на основе дискретного вейвлет-преобразования;

— метод комплексирования на основе статического суммирования.

Типичным представителем методов статического суммирования является метод собственных векторов ковариационной матрицы комплексированного изображения:

$$Y_{fus}(i, j) = w_1 TV(i, j) + w_2 IR(i, j), \quad (3)$$

где весовые коэффициенты  $w_1$  и  $w_2$  вычисляются на основе компонент собственного вектора для максимального собственного значения  $\lambda_{\max} = \max(\lambda_1, \lambda_2)$ .

Собственные значения  $\lambda_1, \lambda_2$  для ковариационной матрицы  $C$  находятся в результате решения характеристического уравнения

$$\det(C - \lambda E) = 0,$$

где  $\lambda^T = (\lambda_1, \lambda_2)$ ;  $E$  — единичная матрица размером  $2 \times 2$ .

Ковариационная матрица  $C$  имеет вид

$$C = \begin{bmatrix} v_a & C_{ab} \\ C_{ab} & v_b \end{bmatrix}.$$

Здесь  $v_a = \frac{1}{mn} \sum_{i,j} (TV(i, j) - \mu_a)^2$ ;  $v_b = \frac{1}{mn} \times \sum_{i,j} (IR(i, j) - \mu_b)^2$ ;  $C_{ab} = \frac{1}{mn} \sum_{i,j} (TV(i, j) - \mu_a) \times (IR(i, j) - \mu_b)$ , где  $m$  и  $n$  — размеры изображения в пикселях;  $\mu_a = \frac{1}{mn} \sum_{i,j} TV(i, j)$ ;  $\mu_b = \frac{1}{mn} \sum_{i,j} IR(i, j)$ .

Второй подход представлен глобальными и локальными методами [3, 4].

В глобальных методах для изменения цвета всех пикселей исходного изображения используют статистические характеристики (как правило, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение) хроматических компонент, рассчитанных по всему изображению-эталону. К глобальным методам относятся «перенос» цвета с изображения-эталона, замена цвета по эталонной карте цветов, метод анализа гистограмм [6–10].

В локальных методах изменение цвета группы пикселей исходного изображения производится с помощью статистических характеристик хроматических компонент, рассчитанных по выбранному участку изображения-эталона [11, 12].

Как показывают исследования, наиболее эффективным из перечисленных методов является метод «переноса» цвета с изображения-эталона. В связи с этим рассмотрим этот метод более подробно.

Данный метод относится к глобальным и состоит в замене статистических моментов для параметров  $\theta_i$  (где  $i = 1, 2, 3$  — количество каналов, соответствующих выбранному цветовому пространству), характеризующих пиксели исходного изображения, соответствующими моментами аналогичных величин изображения-эталона [3–5]. При этом необходимо, чтобы сюжет изображения-эталона соответствовал сюжету исходного изображения, а параметры  $\theta_i$  имели минималь-

ную взаимную корреляцию. Так как для стандартного представления цветного изображения в цветовом пространстве  $RGB$  характерна высокая корреляция между различными каналами, то перед выполнением «переноса» необходимо преобразовать изображение в другую цветовую модель с минимальной межканальной корреляцией. В статье [4] предлагается использовать цветовые пространства  $LAB$ ,  $Y_C B_C R_C$  или  $YUV$ . В данной работе применялась модель  $YIQ$ , которая по своим характеристикам близка к моделям  $Y_C B_C R_C$  ( $YUV$ ).

Метод «переноса» цвета с изображения-эталона предусматривает выполнение следующих операций.

На первом этапе из полутоновых изображений, соответствующих ТВ- и ТПВ-каналам, формируются изображения в ложных цветах. С этой целью используется один из следующих алгоритмов [6–10]:

$$\begin{aligned} R_{fus}(i, j) &= IR(i, j), \\ G_{fus}(i, j) &= TV(i, j), \\ B_{fus}(i, j) &= TV(i, j) - IR(i, j); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R_{fus}(i, j) &= IR(i, j), \\ G_{fus}(i, j) &= TV(i, j), \\ B_{fus}(i, j) &= TV(i, j); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} R_{fus}(i, j) &= IR(i, j) - TV^*(i, j), \\ G_{fus}(i, j) &= TV(i, j) - IR^*(i, j), \\ B_{fus}(i, j) &= TV(i, j) - IR^*(i, j), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $R_{fus}(i, j)$ ,  $G_{fus}(i, j)$ ,  $B_{fus}(i, j)$  —  $RGB$ -компоненты изображения в ложных цветах;  $TV^*(i, j) = TV(i, j) - \min\{TV(i, j), IR(i, j)\}$ ;  $IR^*(i, j) = IR(i, j) - \min\{TV(i, j), IR(i, j)\}$ .

Далее выполняется преобразование изображения в ложных цветах из пространства  $RGB$  в пространство  $YIQ$  ( $RGB \rightarrow YIQ$ ).

На следующем этапе производится «перенос» цвета с изображения-эталона на исходное изображение в соответствии с выражением

$$\theta_s^* = (\theta_s - \mu_s^0) \cdot \sigma_t^0 / \sigma_s^0 + \mu_t^0 \text{ для } \theta \in \{Y, I, Q\}, \quad (7)$$

где индексы  $s$  и  $t$  обозначают, соответственно, исходное изображение и эталон, а символами  $\mu^0$  и  $\sigma^0$  обозначены, соответственно, математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение параметра  $\theta$  по полю изображения.

На последнем этапе выполняется обратное преобразование изображения из цветового пространства  $YIQ$  в  $RGB$  ( $YIQ \rightarrow RGB$ ).

### Алгоритм вычисления цветовых характеристик полутонового комплексированного многоспектрального изображения на основе кластеризации изображения-эталона

Предлагаемый алгоритм относится к локальным методам и подразумевает формирование цветного изображения на основе комплексированного полутонового изображения видимого и инфракрасного спектральных диапазонов  $Y_{fus}(i, j)$ . Хроматические компоненты пикселей исходного комплексированного изображения вычисляются путем цветовой сегментации изображения-эталона в пространстве  $YIQ$  с помощью алгоритма кластеризации по математическому ожиданию. С этой целью для каждого пикселя исходного изображения находится кластер с наиболее близким значением яркости  $C^Y$  и производится присваивание значений компонент  $C^I$  и  $C^Q$  кластера хроматическим компонентам пикселя  $I_{fus}(i, j)$  и  $Q_{fus}(i, j)$ .

Исходными данными для алгоритма являются полутоновые изображения ТВ- и ТПВ-диапазонов. При этом подразумевается, что изображения прошли предварительную обработку, связанную с удалением шумовой составляющей, нормированием по яркостному диапазону, пространственному разрешению, совмещению полей зрения ТВ- и ТПВ-каналов.

*Первый этап.* Полутоновое комплексирование для формирования яркостной (ахроматической) компоненты итогового кадра.

Полутоновое комплексирование многоспектрального изображения предлагается осуществлять с использованием метода комплексирования с приоритетом ТВ-канала (2). Этот вариант попиксельного комплексирования использует текущие характеристики ТПВ-изображения для дополнительного изменения текущих значений яркости телевизионной картины [2]. В результате формируется комплексированное изображение, телевизионное по характеру яркостного распределения (объемное, с наличием теней и линией горизонта), но дополненное информативными элементами, взятыми из тепловизионного изображения. Информация, содержащаяся в ТПВ-канале, позволяет обнаруживать потенциальные цели, препятствия и другие характерные элементы картины окружающего пространства. Результирующее изображение оказывается более информативным при восприятии, чем каждое из исходных в отдельности.

*Второй этап.* Преобразование изображения-эталона из цветового пространства  $RGB$  в пространство  $YIQ$ .

В телевизионном стандарте NTSC цветовая информация представляется с помощью одного яркостного сигнала  $Y$  и двух цветоразностных сигналов:  $I$  (цветовой тон) и  $Q$  (насыщенность). Компоненты  $YIQ$  получаются из тройки  $RGB$  с помощью следующего преобразования [13]:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,211 & -0,523 & 0,312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (8)$$

*Третий этап.* Цветовая сегментация изображения-эталона в пространстве  $YIQ$  с помощью алгоритма кластеризации по математическому ожиданию.

Для сегментации изображений используется множество разнообразных методов. К ним относятся классические алгоритмы кластеризации, простые гистограммные методы, рекурсивный гистограммный метод Оландера и др. [14]. Гистограммные методы хорошо работают с относительно простыми цветными изображениями сцен с искусственными объектами и одноцветными областями. Результаты обработки сложных изображений естественных сцен оказываются хуже, так как в текстуре изображения образуется большое количество мелких сегментированных областей. В связи с этим при обработке сложных изображений предпочтение отдается алгоритмам кластеризации.

Цель кластеризации в общем случае состоит в разбиении множества векторов, в качестве которых при анализе изображений обычно используются характеристики пикселей или малых окрестностей пикселей [14], на подмножества «похожих» векторов.

Считаем, что при цветовой сегментации изображения используется  $K$  кластеров  $C_1, C_2, \dots, C_K$  с математическими ожиданиями признаков  $m_1, m_2, \dots, m_K$ . Для оценки близости векторов  $\mathbf{x}_i$  исходных данных к назначенным для них кластерам введем квадратичную метрику следующего вида:

$$D = \sum_{k=1}^K \sum_{\mathbf{x}_i \in C_k} \|\mathbf{x}_i - m_k\|^2. \quad (9)$$

Алгоритм кластеризации по математическому ожиданию представляет собой простую итерационную процедуру поиска экстремума, которая включает следующие операции [14].

1. Присвоить счетчику итераций  $ic$  значение 1.
2. Случайным образом выбрать  $K$  значений математических ожиданий  $m_1(1), m_2(1), \dots, m_K(1)$ .
3. Для каждого вектора  $\mathbf{x}_i$  вычислить расстояние  $D(\mathbf{x}_i, m_k(ic))$  до соответствующего математического ожидания  $m_k(ic)$  ( $k = 1, \dots, K$ ) и поместить

$\mathbf{x}_i$  в кластер  $C_j$  с ближайшим вектором математического ожидания.

4. Увеличить  $ic$  на 1 и скорректировать значения математических ожиданий  $m_1(ic), m_2(ic), \dots, m_K(ic)$ .

5. Повторять шаги 3 и 4 до тех пор, пока при всех  $k$  не будет выполняться равенство  $C_k(ic) = C_k(ic + 1)$ .

Проведенный анализ результатов кластеризации изображения-эталона только по яркостной компоненте  $Y$  показал неудовлетворительный результат, поэтому было решено использовать для каждого пикселя все три признака — компоненты  $Y, I, Q$ . В этом случае вектор  $\mathbf{x}_i$  значений яркостей пикселей преобразуется в матрицу, содержащую яркостную  $Y$  и хроматические  $I, Q$  компоненты размером  $m \times n \times 3$ , где  $m$  и  $n$  — размеры изображения в пикселях.

Помимо алгоритма кластеризации по математическому ожиданию, в работе также рассматривался алгоритм нечеткой кластеризации  $c$ -средних ( $c$ -means). Результаты кластеризации изображения-эталона оказались примерно одинаковыми, но так как алгоритм нечеткой кластеризации выполняется медленнее, то был выбран алгоритм кластеризации по математическому ожиданию.

*Четвертый этап.* Поиск для каждого пикселя с яркостью  $Y_{fus}(i, j)$  кластера с наиболее близким значением  $C_k^Y$  и присвоение значений компонент кластера  $C_k^I$  и  $C_k^Q$  хроматическим компонентам пикселя  $I_{fus}(i, j)$  и  $Q_{fus}(i, j)$ .

Номер кластера с наиболее близким значением яркости соответствует номеру элемента вектора  $|Y_{fus}(i, j) - C_k^Y|$ , ( $k = 1, \dots, K$ ) с минимальным значением

$$k^* = \arg \min_k |Y_{fus}(i, j) - C_k^Y|, k = 1, \dots, K. \quad (10)$$

Хроматические компоненты текущего пикселя определяются выражениями

$$I_{fus}(i, j) = C_{k^*}^I, Q_{fus}(i, j) = C_{k^*}^Q. \quad (11)$$

*Пятый этап.* Преобразование полученного цветного комплексированного изображения из цветового пространства  $YIQ$  в пространство  $RGB$ .

Компоненты  $RGB$  получаются из  $YIQ$  с помощью обратного преобразования [13]:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,000 & 0,956 & 0,621 \\ 1,000 & -0,272 & -0,647 \\ 1,000 & -1,106 & 1,703 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix}, \quad (12)$$

которое является обратным преобразованием по отношению к формуле (8).

**Оценка эффективности алгоритма комплексирования многоспектрального изображения на основе кластеризации изображения-эталона**

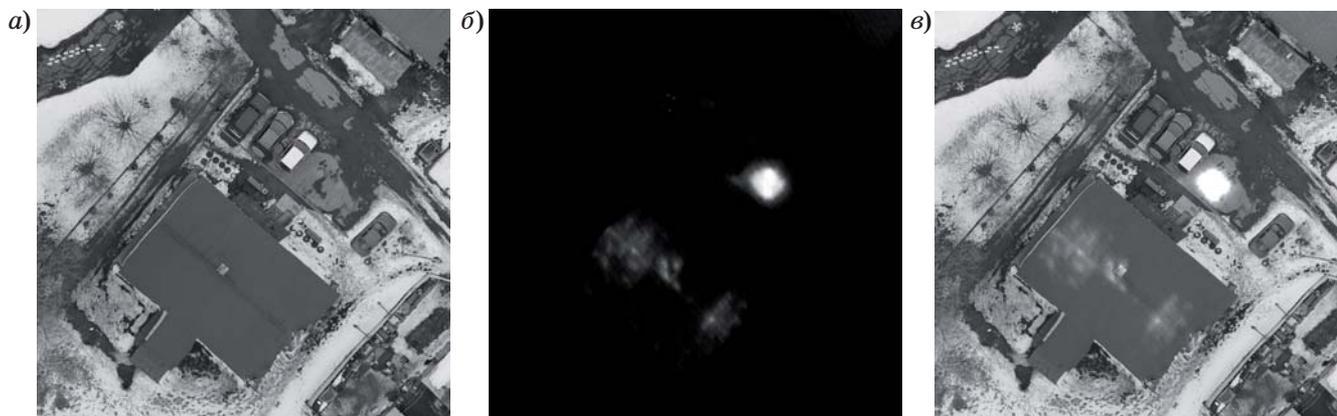
Апробация алгоритма определения цветовой информации проводилась на изображениях, полученных в результате аэрофотосъемки местности в видимом и длинноволновом инфракрасном диапазоне при помощи БПЛА «Геоскан 201» [15]. Из мозаики ТВ- и ТПВ-снимков были вырезаны изображения размером 1024 × 1024 пикселей.

Вычисления проводились в среде MatLab R2010a с использованием функций пакета Image Processing Toolbox [13].

*Первый этап.* Полутоновые ТВ-, ТПВ-изображения и результат их комплексирования с использованием алгоритма (2) приведены на рис. 1, а-в.

*Второй и третий этапы.* Исходное изображение-эталон и изображение-эталон, полученное путем разбиения на 10 кластеров, показаны на рис. 2, а и б.

Как следует из рис. 2, качество сегментации изображения-эталона достаточно хорошее. Правильно отображены основные цвета сюжета (за исключением мелких деталей). Число кластеров, равное десяти, принято в качестве начального значения. Дальнейшее увеличение числа кластеров улучшает качество сегментации, так как все большее число малых по площади областей приобретает свой исходный цвет, но при этом резко увеличивается время вычислений. Уменьшение же числа кластеров приводит к потере важной цветовой информации, что негативно сказывается на результатах работы алгоритма. Число кластеров может определяться из



■ **Рис. 1.** Результаты комплексирования полутоновых ТВ- и ТПВ-изображений: а — исходное ТВ-изображение; б — исходное ТПВ-изображение; в — комплексированное изображение  
 ■ **Fig. 1.** Fusion results of greyscale visible and thermal images: а — initial visible image; б — initial thermal image; в — fusion image



■ **Рис. 2.** Результаты кластеризации изображения-эталона: а — исходное ТВ-изображение-эталон; б — сегментированное на 10 кластеров изображение-эталон  
 ■ **Fig. 2.** Clustering results of sample image: а — initial visible sample image; б — segmented into 10 clusters sample image

анализа нормированных гистограмм исходного изображения-эталона и полученного после сегментации.

*Четвертый и пятый этапы.* Комплексированное изображение после вычисления его хроматических компонент дано на рис. 3, а. На рис. 3, б представлено специально сконструированное исходное цветное комплексированное изображение, полученное на основе цветного ТВ-изображения. Такое изображение позволяет оценить правильность определения хроматических компонент различными алгоритмами комплексирования, но в реальных задачах оно отсутствует, поскольку исходные ТВ- и ТПВ-изображения являются полутоновыми. Последовательность действий при формировании исходного цветного комплексированного изображения включает в себя такие шаги, как перевод цветного ТВ-изображения в пространство  $YIQ$  ( $RGB \rightarrow YIQ$ ), слияние яркостных компонент ТВ- и ТПВ-каналов по формуле (2) и, наконец, восстановление первоначальной цветовой гаммы  $YIQ \rightarrow RGB$ , соответствующей исходному ТВ-изображению.

Результаты, представленные на рис. 3, демонстрируют хорошее качество определения цветовой информации методом кластеризации изображения-эталона. Так, правильно переданы цвета почвы, снега, красно-коричневой крыши здания. При этом иногда наблюдается ложное окрашивание почвы в красно-коричневый цвет из-за схожести яркостей этих участков и яркости крыши. Цвета припаркованных машин переданы неправильно из-за отсутствия данной информации в изображении-эталоне.

Анализ полученного цветного комплексированного изображения позволяет также сделать

вывод о том, что хотя увеличение числа кластеров при сегментации изображения-эталона улучшает его качество, но это может сказаться негативно на исходном комплексированном изображении из-за увеличения ложно окрашенных участков.

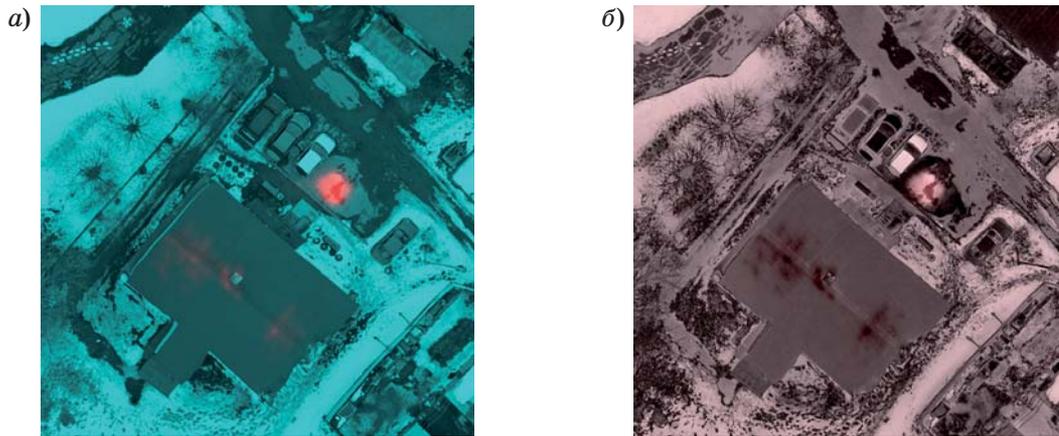
Для сравнения результатов комплексирования многоспектральных изображений на основе предложенного алгоритма кластеризации изображения-эталона с традиционными алгоритмами комплексирования на рис. 4 приведены результаты формирования цветного комплексированного изображения методом «переноса» цвета с изображения-эталона. На рис. 4, а представлено изображение в ложных цветах, полученное по алгоритму (5), а на рис. 4, б показан результат «переноса» цвета с изображения-эталона (см. рис. 2, а).

Визуальное сравнение результатов моделирования глобального метода «переноса» цвета (см. рис. 4, б) и локального метода кластеризации изображения-эталона (см. рис. 3, а) указывает на явное преимущество предложенного в статье метода вычисления цветовой информации. Хотя результат «переноса» ближе к гамме естественных цветов по сравнению с рис. 4, а, говорить об удовлетворительном качестве передачи цветов сложно. Вероятно, для получения более адекватной гаммы цветов в методе «переноса» нужно более тщательно подходить к выбору изображения-эталона.

Для численной оценки результатов комплексирования многоспектральных изображений на основе предложенного алгоритма и алгоритма «переноса» цвета с изображения-эталона вычислим расстояния  $L$  между 256-разрядными нор-



- **Рис. 3.** Результаты вычисления хроматических компонент методом кластеризации изображения-эталона: а — цветное комплексированное изображение, полученное методом кластеризации изображения-эталона; б — цветное комплексированное изображение, полученное на основе цветовой гаммы исходного ТВ-изображения
- **Fig. 3.** The results of calculating chromatic component via method of clustering sample image: а — color fusion image obtained by clustering sample image; б — color fusion image obtained on the basis of color gamma of initial visible image



■ **Рис. 4.** Цветное комплексированное изображение, полученное методом «переноса» цвета с изображения-эталона: *а* — комплексированное изображение в ложных цветах, рассчитанное по алгоритму (5); *б* — цветное изображение после «переноса» цвета с изображения-эталона  
 ■ **Fig. 4.** Color fusion image obtained by the method of color “transfer” from the sample image: *a* — false-color fusion image calculated according to algorithm (5); *b* — color image after “transfer” of the color from the sample image

мированными гистограммами этих изображений и исходным цветным комплексированным изображением (см. рис. 3, б) [14].

Обозначим через  $H^{s,R}, H^{s,G}, H^{s,B}$  нормированные гистограммы  $R, G, B$ -каналов исходного цветного комплексированного изображения; через  $H^{cl,R}, H^{cl,G}, H^{cl,B}$  — нормированные гистограммы цветного изображения, полученного методом кластеризации изображения-эталона; через  $H^{tr,R}, H^{tr,G}, H^{tr,B}$  — нормированные гистограммы цветного изображения, полученного методом «переноса» цвета с изображения-эталона.

Расстояние между нормированными гистограммами исходного цветного изображения и полученного методом кластеризации изображения-эталона будем определять по формуле

$$L(H^s, H^{cl}) = \sum_{i=1}^{256} \left[ \left| H_i^{s,R} - H_i^{cl,R} \right| + \left| H_i^{s,G} - H_i^{cl,G} \right| + \left| H_i^{s,B} - H_i^{cl,B} \right| \right]. \quad (13)$$

Аналогичное расстояние между нормированными гистограммами исходного цветного изображения и полученного методом «переноса» цвета с изображения-эталона находится следующим образом:

$$L(H^s, H^{tr}) = \sum_{i=1}^{256} \left[ \left| H_i^{s,R} - H_i^{tr,R} \right| + \left| H_i^{s,G} - H_i^{tr,G} \right| + \left| H_i^{s,B} - H_i^{tr,B} \right| \right]. \quad (14)$$

После подстановки численных значений получаем

$$L(H^s, H^{cl}) = 1,0073; L(H^s, H^{tr}) = 2,0116.$$

Таким образом, и численные расчеты показывают более высокое качество определения цветовой информации методом кластеризации изображения-эталона по сравнению с методом «переноса» цвета с изображения-эталона.

### Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о преимуществах разработанного алгоритма вычисления цветовых характеристик полутонного комплексированного многоспектрального изображения по сравнению с существующими глобальными методами комплексирования. Из недостатков алгоритма можно отметить большее время выполнения расчетов из-за многократной обработки данных итерационной процедурой кластеризации. Увеличить быстродействие алгоритма можно путем уменьшения размера изображения-эталона с помощью «прореживания» по вертикали и горизонтали. При этом необходимо, чтобы уменьшенное изображение-эталон содержало в тех же пропорциях области цвета исходного изображения-эталона.

Сами изображения-эталоны могут представлять собой записанные в памяти бортовой вычислительной системы аэрофотоснимки местности, над которыми происходит полет, полученные при дневном освещении в условиях хорошей видимости, или же снимки со схожим сюжетом и цветовой гаммой. Количество изображений-эталонов определяется числом участков местности с резко различающимися цветовыми характеристиками.

Дальнейшее улучшение качества определения цветовых характеристик может быть достигнуто сочетанием цветовой сегментации с текстурной.

Литература

1. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах // Тр. науч.-техн. конф.-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010» / под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 11–44.
2. Костяшкин Л. Н., Бабаев С. И., Логинов А. А., Павлов О. В. Технологии систем улучшенного/синтезированного зрения для управления летательными аппаратами // Тр. науч.-техн. конф.-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010» / под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 45–56.
3. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / под ред. Л. Н. Костяшкина, М. Б. Никифорова. — М.: Физматлит, 2016. — 240 с.
4. Богданов А. П., Холопов И. С. Алгоритмы формирования цветного комплексированного изображения из многоспектральных монохромных на основе методов преобразования цветов // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 26–32.
5. Холопов И. С. Реализация алгоритма формирования цветного изображения по сигналам монохромных видеодатчиков видимого и длинноволнового инфракрасного диапазонов в цветовом пространстве  $YCbCr$  // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 2. С. 266–274.
6. Image Fusion and its Applications / ed. by Y. Zheng. — Rijeka: InTech, 2011. — 242 p.
7. Toet A., Hogervorst M. A. Progress in Color Night Vision // Optical Engineering. 2012. Vol. 51(1). P. 1–19.
8. Shi S., Wang W., Jin Y. Zhao Color Night Vision based on Color Transfer in YUV Color Space // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 6623. 66230B.
9. Christinal J. J., Jebaseeli T. J. A Novel Color Image Fusion for Multi Sensor Night Vision Images // International Journal of Computer Applications Technology and Research. 2013. Vol. 2(2). P. 155–159.
10. Li G., Xu S., Zhao X. Fast Color-Transfer-based Image Fusion Method for Merging Infrared and Visible Images // Proc. of the SPIE. 2010. Vol. 7710. 77100S.
11. Efros A. A., Freeman W. T. Image Quilting for Texture Synthesis and Transfer // Proc. of ACM SIGGRAPH. 2001. P. 341–346.
12. Welsh T., Ashikhmin M., Mueller K. Transferring Color to Greyscale Images // SIGGRAPH '02: Proc. of the 29th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. 2002. P. 277–280.
13. Гонсалес Р. С., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. — М.: Техносфера, 2006. — 615 с.
14. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение [Электронный ресурс] / пер. с англ. — 2-е изд. (эл.). — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 752 с.
15. Разработана новая технология тепловизионной съемки с БПЛА. <http://prinwings.ru/news/116-2016-04-27-06-29-42> (дата обращения: 06.07.2017).

UDC 621.391.26

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.15

Algorithm of Color Fusion for Multispectral Grayscale Images based on K-Means Clustering of Sample Image

Neretina V. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, neretina@bk.ru

Efanov V. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, efanov@mail.ru

<sup>a</sup>Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx St., 450008, Ufa, Russian Federation

**Introduction:** Multispectral aviation systems of technical vision find extensive application in optoelectronic investigation, in providing better awareness of mobile equipment crews, or in control under difficult weather conditions. Information from monochrome sensors with different spectral characteristics is pooled using special fusion algorithms. However, the existing fusion algorithms are usually sensitive to noise in the video data due to their limited dynamic ranges of light and color, errors in the calibration characteristics and in the temporal bindings of the video stream. **Purpose:** An algorithm should be developed which would provide a structurally stable solution for the problem of multispectral image data fusion on the set of possible photometric situations. **Results:** Fusion methods have been reviewed for grayscale television and thermal images, forming a grayscale or false-color result. The global methods has been discussed for transferring the color from a sample image. An algorithm has been developed for computing the color characteristics of a grayscale complexed multi-spectral image based on a sample image clustering. This algorithm comprises the following: grayscale fusion to form the brightness components of the final image; converting the sample image from RGB color space to YIQ space; color segmentation of the sample image in YIQ space using the K-means clustering algorithm; search for each pixel of the initial image looking for the cluster with the nearest brightness and assigning the color information of the cluster to the chromatic components of the pixel; converting the obtained complexed image from YIQ color space to RGB space. Concrete examples of image processing in MatLab prove the effectiveness of the proposed algorithm as compared to the existing global fusion methods. **Practical relevance:** Analysis of normalized histograms has shown that the proposed algorithm of calculating the color characteristics provides a higher quality of determining color information as compared to «transferring» the color from a sample image.

**Keywords** — Multispectral Systems of Technical Vision, RGB and YIQ Color Spaces, Image Fusion, Clustering Algorithms.

## References

1. Vizilter Yu. V., Zheltov S. Yu. Problems of Technical Vision in Aviation Systems. *Trudy nauchno-tekhnicheckoi konferentsii-seminara "Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniia mobil'nymi ob'ektami-2010"* [Proc. of the Conf.-Workshop-2010 "Computer Vision in Control Systems of the Mobile Objects"]. Moscow, KDU Publ., 2011, pp. 11–44 (In Russian).
2. Kostyaskin L. N., Babaev S. I., Loginov A. A., Pavlov O. V. Technology of Improved Synthesized Vision Systems to Aircraft Control. *Trudy nauchno-tekhnicheckoi konferentsii-seminara "Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniia mobil'nymi ob'ektami-2010"* [Proc. of the Conf.-Workshop-2010 "Computer Vision in Control Systems of the Mobile Objects"]. Moscow, KDU Publ., 2011, pp. 45–56 (In Russian).
3. *Obrabotka izobrazhenii v aviatsionnykh sistemakh tekhnicheskogo zreniia* [Image Processing in Aviation Systems of Technical Vision]. Ed. L. N. Kostyashkin, M. B. Nikiforov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2016. 240 p. (In Russian).
4. Bogdanov A. P., Kholopov I. S. Algorithms of Color Fusion from Monochrome Multispectral Images Based on Color Conversion Methods. *Tsifrovaia obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], 2013, no. 3, pp. 26–32 (In Russian).
5. Kholopov I. S. Implementation of an Algorithm for Forming a Color Image from Monochrome Images of Visible and Near Infrared Cameras in the YCbCr Color Space. *Komp'iuternaia optika* [Computer Optics], 2016, vol. 40, no. 2, pp. 266–274 (In Russian). doi:10.18287/2412-6179-2016-40-2-266-274
6. *Image Fusion and its Applications*. Ed. Y. Zheng Rijeka, InTech, 2011. 242 p.
7. Toet A., Hogervorst M. A. Progress in Color Night Vision. *Optical Engineering*, 2012, no. 51(1), pp. 1–19.
8. Shi S., Wang L., Jin W., Zhao Y. Color Night Vision based on Color Transfer in YUV Color Space. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 6623, 66230B.
9. Christinal J. J., Jebaseeli T. J. A Novel Color Image Fusion for Multi Sensor Night Vision Images. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 2013, no. 2(2), pp. 155–159.
10. Li G., Xu S., Zhao X. Fast Color-Transfer-based Image Fusion Method for Merging Infrared and Visible Images. *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7710, 77100S.
11. Efros A. A., Freeman W. T. Image Quilting for Texture Synthesis and Transfer. *Proc. of ACM SIGGRAPH*, 2001, pp. 341–346.
12. Welsh T., Ashikhmin M., Mueller K. Transferring Color to Greyscale Images. *Proc. of the 29th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques SIGGRAPH '02*, 2002, pp. 277–280.
13. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. *Digital Image Processing using MATLAB*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2004. 344 p.
14. Shapiro L. G., Stockman G. C. *Computer Vision*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2001. 580 p.
15. *Razrabotana novaia tekhnologiya teplovizionnoi s'emki s BPLA* [The New Technology of Thermal Survey with the UAV is Developed]. Available at: <http://prinwings.ru/news/116-2016-04-27-06-29-42> (accessed 6 July 2017).

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.

## УВЕЛИЧЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ЭКРАНОПЛАНА ЗА СЧЕТ ОГИБАНИЯ ВОЛН

А. Ю. Княжский<sup>а</sup>, ассистент

А. В. Небылов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

В. А. Небылов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** одной из основных проблем, тормозящих широкое внедрение экранопланов на мировой рынок, является высокая зависимость их подъемной силы от морского волнения. Это препятствует осуществлению безопасных и экономически выгодных грузопассажирских перевозок на большие расстояния над водной поверхностью. **Цель исследования:** разработка и оценка эффективности метода огибания аппаратом гребней морских волн. **Методы:** математическое моделирование на основе заранее заданной вероятности столкновения с морской поверхностью; имитационное моделирование для определения допустимой опорной истинной высоты полета управляемого экраноплана. **Результаты:** предложен способ огибания гребней морских волн, позволяющий повысить аэродинамическое качество экраноплана и снизить вероятность его столкновения с волной при интенсивном морском волнении. Суть метода заключается в прокладке траектории аппарата по желобам морских волн за счет движения в направлении минимального градиента морской поверхности в определенном секторе, направление которого совпадает с направлением на конечную точку маршрута. **Практическая значимость:** применение предложенного метода управления полетом экраноплана при интенсивном морском волнении дает возможность повысить безопасность его полета, а также его аэродинамическое качество, что, в свою очередь, позволяет снизить расход топлива.

**Ключевые слова** — экраноплан, морское волнение, управление движением, транспорт, минимизация высоты, безопасность полетов, оптимизация траектории, топливная эффективность.

### Введение

Экраноплан (Ground Effect Vehicle — GEV) является перспективным транспортным средством будущего. Он способен иметь грузоподъемность морского судна и скорость, близкую к авиационной, объединяя преимущества обоих типов транспортных аппаратов. В случае обнаружения неисправности возможна быстрая посадка на водную поверхность без совершения специальных посадочных маневров, что повышает безопасность полетов. Экранопланы относят к безаэродромной авиации.

Данный тип летательных аппаратов можно использовать для решения многих транспортных задач. Возможные страны-разработчики определяются исходя из их географического положения и стратегических интересов. Наибольший интерес к освоению экранопланных технологий и продвижению их на рынок представляют страны с высоким экономическим и технологическим уровнем развития, имеющие выход к морю. В частности, предельного внимания заслуживают Россия, Южная Корея, Китай, США, Япония и Австралия. Например, южнокорейская компания Wingship Technology Corp. уже готовит серийное производство больших экранопланов WTC-500 и WTC-1500 (рис. 1) и имеет возможность выхода на азиатский и американский рынки [1].

До конца 80-х гг. в России уделялось большое внимание разработке экранопланов, проводилось

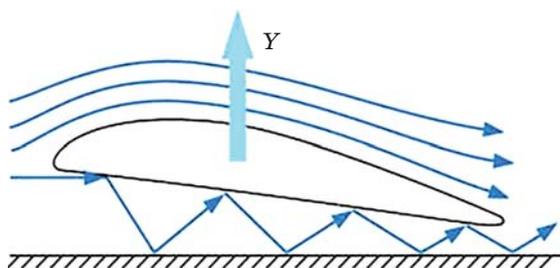
множество исследований и опытно-конструкторских работ, но позже государственное финансирование было приостановлено более чем на 20 лет. То технологическое отставание, которое сформировалось за эти годы, требует отнестись к отечественному экранопланостроению достаточно серьезно.

Свои преимущества экраноплан получает за счет использования экранного эффекта, заключающегося в возникновении области повышенного давления между его корпусом и опорной поверхностью при расстоянии между ними, мень-



■ Рис. 1. Экраноплан WTC-1500

■ Fig. 1. GEV WTC-1500



■ **Рис. 2.** Принцип возникновения воздушной подушки  
 ■ **Fig. 2.** Principle of emergence of air cushion

шем 0,2 хорды крыла. Повышенное давление образуется в результате переотражений набегающего потока воздуха между нижней плоскостью крыла и опорной поверхностью (экраном) [2–4]. Принцип возникновения динамической воздушной подушки при полете вблизи экрана проиллюстрирован на рис. 2 [5].

Таким образом, при движении вблизи экрана подъемная сила аппарата формируется не только за счет понижения давления над верхней плоскостью крыла, как у обычных самолетов, но и в результате повышения давления под нижней плоскостью [6, 7].

В основном экранопланы летают над водой, но также возможны полеты над степью, пустыней, тундрой и любой другой ровной поверхностью. Низковысотные полеты над земными типами поверхностей ограничены из-за высокой вероятности столкновения с препятствиями. Над водной поверхностью препятствия в виде морских судов, представляющие наибольшую опасность для низколетящих аппаратов, можно легко обнаруживать во время полета методами активной локации. Отрицательной стороной использования водной поверхности в качестве опорной является ее подверженность волнению, особенно в океане. Это является одним из основных препятствий для межконтинентальных перелетов на экранопланах. Морское волнение уменьшает аэродинамическое качество низколетящего аппарата, рассеивая переотражаемый набегающий воздушный поток. Кроме того, при сильном морском волнении увеличивается вероятность столкновения с гребнями волн, из-за чего приходится повышать высоту полета, что снижает аэродинамическое качество низколетящего аппарата. Адекватные модели волновых возмущений рассмотрены в работах [8, 9].

Повысить минимальную высоту полета, на которой будет наблюдаться экранный эффект, можно, увеличив размеры аппарата, однако это не всегда выгодно из-за возрастания стоимости его разработки и эксплуатации. В статье предлагается способ понижения минимального предела вы-

соты полета для увеличения действия экранного эффекта и повышения аэродинамического качества аппарата за счет огибания крупных морских волн. Такой режим управления полетом экраноплана уменьшает вероятность столкновения аппарата с гребнями волн.

### Исследование минимально-градиентного метода управления

Под аэродинамическим качеством крыла или летательного аппарата понимается отношение его подъемной силы к силе лобового сопротивления. Исходя из того, что подъемная сила и лобовое сопротивление определяются по формулам

$$Y = C_y S \frac{\rho v^2}{2}; \quad (1)$$

$$Q = C_x S \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2)$$

где  $C_y$  — коэффициент подъемной силы, зависящий от удлинения, формы профиля крыла и угла атаки и определяемый продувками модели крыла;  $C_x$  — коэффициент лобового сопротивления крыла, характеризуемый продувками его модели;  $S$  — характерная площадь крыла;  $\rho$  — плотность воздуха на высоте полета;  $v$  — скорость набегающего потока [10].

Аэродинамическое качество определяется отношением коэффициентов

$$K = \frac{Y}{Q} = \frac{C_y}{C_x}. \quad (3)$$

При движении вблизи экрана аэродинамическое качество значительно возрастает с уменьшением высоты полета. Поэтому минимизация средней истинной высоты полета является одной из основных задач, решаемых при построении систем автоматического управления движением экранопланов.

Прокладка траектории по желобам крупных волн уменьшает вероятность столкновения экраноплана с волной, позволяя при этом уменьшить среднюю истинную высоту полета, вследствие чего увеличивается аэродинамическое качество аппарата. Если направление желобов волн сильно отличается от требуемого направления движения, например, движение проходит поперек волн, то предлагаемый способ управления применять нецелесообразно. Желоба волн имеют наименьшие высоты по сравнению с другими областями морской поверхности. Это означает, что движение по желобам можно рассматривать как движение в направлении минимального градиента высот морской поверхности  $\xi$ , рассчитывае-

мого относительно некоторой точки поверхности под корпусом экраноплана:

$$\gamma(t) = \min \nabla \zeta(x, y)$$

при  $\gamma_{\min}(t) < \gamma(t) < \gamma_{\max}(t)$ , (4)

где  $\gamma$  — курс аппарата;  $x$  и  $y$  — пространственные координаты;  $t$  — время.

Сектор разрешенных направлений движения относительно продольной оси аппарата  $[y_{\min}, y_{\max}]$  определяется в зависимости от скорости, расстояния до конечной точки маршрута, кратчайшего направления движения, высоты волн и направлен на точку следования.

При движении в направлении минимального градиента подстилающей поверхности уменьшается частота изменений истинной высоты полета аппарата, что позволяет уменьшить опорную высоту при той же вероятности касания корпусом экраноплана морской поверхности. Причиной возникновения колебаний истинной высоты экраноплана является морское волнение, представляемое суммой некоторого числа пространственных гармоник с разными частотами, амплитудами и фазами. Математическая модель морского волнения подробно описана в работах [11–17].

Экраноплан обладает свойством самостабилизации по истинной высоте полета, поскольку при ее изменении подъемная сила, зависящая от расстояния до опорной поверхности, восстанавливает первоначальное значение высоты. Поэтому при прохождении желоба волны экраноплан постепенно снижает абсолютную высоту полета, а при пролете над ее гребнем набирает. Поскольку длины океанских волн часто превышают 300, а иногда и 500 м, можно говорить о возможности уменьшения колебаний истинной высоты экраноплана несмотря на низкочастотные неровности морской поверхности.

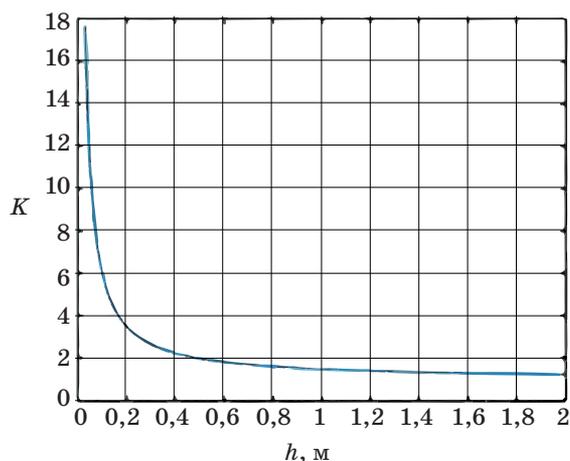
Для оценки эффективности этого метода управления полетом экраноплана в работе был использован метод математического моделирования на основе заранее заданной вероятности столкновения с морской поверхностью, путем имитационного моделирования определялась допустимая опорная истинная высота полета управляемого экраноплана. Далее вычислялись траектории управляемого и неуправляемого полетов и по формулам (1)–(3) определялись средние значения аэродинамического качества (АК) экраноплана при управляемом и неуправляемом полетах.

Общая эффективность алгоритма управления определяется по соотношению

$$\left( \hat{K}_y / \hat{K}_n - 1 \right) \times 100\%, \quad (5)$$

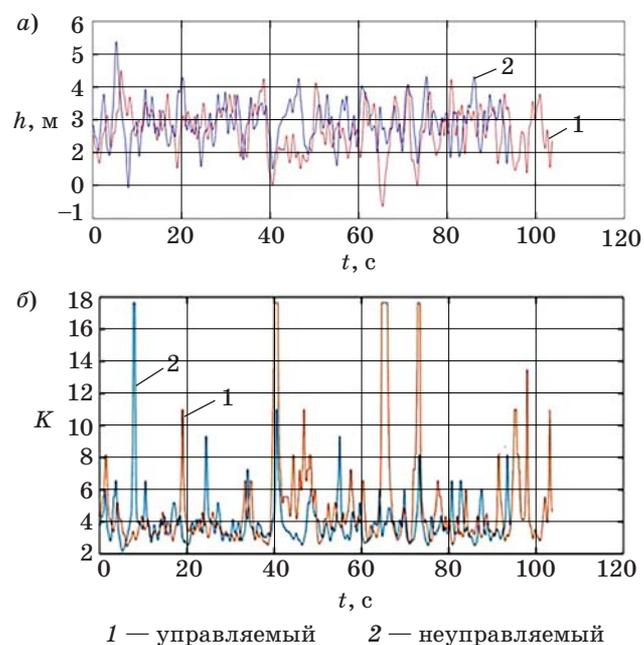
где  $\hat{K}_y, \hat{K}_n$  — среднее значение аэродинамического качества для управляемого и прямолинейного полета соответственно.

Зависимость отношения АК экраноплана в зоне действия экранного эффекта к АК аппарата,



■ **Рис. 3.** Зависимость аэродинамического качества экраноплана от высоты (для  $h > 0,03$ ), рассчитанная по выражению (6)

■ **Fig. 3.** Dependence of the aerodynamic quality of the GEV on the altitude (for  $h > 0,03$ ), calculated by (6)



■ **Рис. 4.** Зависимость изменения истинной высоты экраноплана (а) и аэродинамического коэффициента (б) от времени при управляемом и неуправляемом полетах

■ **Fig. 4.** Dependences of changes in the true height of the GEV (a) and aerodynamic coefficient (b) versus time with controlled (red) and uncontrolled (blue) flights

совершающего полет вдали от экрана, выражается формулой [15]

$$K/K_{\infty} = 1 + b/25h \text{ при } h/b \geq 0,03, \quad (6)$$

где  $b$  и  $h$  — хорда крыла и истинная высота полета соответственно.

Зависимость АК экраноплана от его удаленности от экрана представлена на рис. 3. На рис. 4, а показаны зависимости изменений истинной высоты экраноплана от времени при управляемом и неуправляемом полетах на скорости 36 м/с с разрешенной шириной сектора движения 50°. На рис. 4, б показаны зависимости аэродинамического коэффициента от времени для соответствующих траекторий.

При морском волнении 4–7 баллов, скорости 13–38 м/с, максимальной угловой скорости поворота 5–15 град/с и различии требуемого и наилучшего направлений движения не более чем на 40°

для управляемого полета АК экраноплана в среднем увеличивается на 21 %, длина траектории возрастает на 10 %, высота полета относительно среднего уровня моря снижается на 0,5–2,5 м.

### Заключение

Результаты моделирования свидетельствуют о значительном возрастании аэродинамического качества экраноплана при использовании в его автопилоте минимально-градиентного метода управления и подтверждают эффективность обхода гребней волн при интенсивном морском волнении. Отсюда следует вывод о целесообразности создания адаптивной системы управления движением экраноплана над взволнованной морской поверхностью, подстраивающей параметры движения аппарата под текущие погодные условия для улучшения аэродинамического качества аппарата и повышения безопасности полета.

### Литература

1. Небылов А. В., Небылов В. А. Проблемы, теория и системы автоматического управления движением экранопланов // XII Всерос. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. 2014. С. 3391–3400.
2. Tofa M. M., Maimun A., Ahmed Y. M., Jamei S., Priyanto A., and Rahimuddin. Experimental Investigation of a Wing-in-Ground Effect Craft // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Article ID 489308. 7 p. doi:10.1155/2014/489308
3. Yun Liang, Bliault Alan, Doo Johnny. WIG Craft and Ekranoplan: Ground Effect Craft Technology. — Springer, 2010. — 443 p.
4. Pagowski Z. T., Szafran K. “Ground Effect” Inter-Modal Fast Sea Transport // TransNav: The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2014. Vol. 8. N 2. P. 317–320.
5. Pałowski Z. T., Szafran K., Kończak J. “Ground Effect” Transport on the Baltic Sea, Maritime Transport & Shipping // TransNav: The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2014. Vol. 8. N 2. P. 221–234.
6. Wang H., Teo C. J., Khoo B. C., Goh C. J. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft // 7th Asian-Pacific Conf. on Aerospace Technology and Science. 2013. P. 15–24.
7. Rozhdestvensky K. V. Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect. — Springer Science & Business Media, 2000. — 352 p.
8. Nebylov A. V. Prospects for Cooperation in New-Generation Alternate High Speed Water-Borne Air Transportation System Development // AeroIndia Intern. Seminar. Bangalore, 2011. P. 1–6.
9. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Seaplane Landing Smart Control at Wave Disturbances // 18th IFAC World Congress. Milano, 2011. P. 3021–3026.
10. Боднер В. А. Системы управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1973. — 504 с.
11. Бородай И. К., Невцветаев Ю. А. Мореходность судов. — Л.: Судостроение, 1982. — 287 с.
12. Галенин Б. Г. и др. Ветер, волны и морские порты / под ред. Ю. М. Крылова. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 264 с.
13. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в мировом океане. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 256 с.
14. Гургенидзе А. Т., Трапезников Ю. А., Румянцева С. А. и др. Теоретические основы и методы расчета ветрового волнения / под ред. И. Н. Давидана. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 263 с.
15. Nebylov A. V., Nebylov V. A., Pierre Fabre. WIG-craft Flight Control above the Waved Sea // Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace Vehicles (ACNAAV 2015), Seville, Spain, June 10–12, 2015. P. 102–107.
16. Князешский А., Небылов А., Небылов В. Methods for Signal Processing and Motion Control of Ground Effect Vehicle // 4th IEEE Intern. Workshop on Metrology for Aerospace, Padua, Italy, 2017. P. 307–311.
17. Князешский А. Я., Небылов А. В., Небылов В. А. Optimization of WIG-craft 3D-trajectory near the Rough Sea Surface // EUCASS (European Conf. for Aerospace Sciences), Milan, Italy, 2017. <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-338.pdf> (дата обращения: 10.10.2017).

UDC 629.7.05

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.24

## Improving GEV Aerodynamic Quality by Enveloping Sea Waves

Knyazhsky A. Yu.<sup>a</sup>, Assistant Professor, knjagskij@mail.ruNebylov A. V.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, nebylov@aanet.ruNebylov V. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, vladnebylov@gmail.com<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** One of the main problems hindering the wide introduction of Ground Effect Vehicles to the world market is their high sensitivity to sea waves. This prevents the implementation of safe and cost-effective freight and passenger transport over long distances above the water surface. **Purpose:** Developing a method for enveloping the sea waves by a vehicle, and assessing its effectiveness. **Methods:** Mathematical modeling based on a predetermined probability of a collision between a GEV and the sea surface; simulation to determine the permissible reference flight altitude above the sea for a controlled GEV. **Results:** A method for enveloping the crests of sea waves is proposed which can increase the aerodynamic quality of a GEV and reduce the probability of its collision with a wave when the sea is disturbed. The essence of the method is laying a vehicle trajectory along the sea wave chutes by moving in the direction of the minimum gradient of the underlying surface in a certain sector whose direction coincides with the direction to the final point of the route. **Practical relevance:** The proposed method allows you to improve the flight safety and aerodynamic quality of a GEV and, hence, to reduce its fuel consumption.

**Keywords** — Ground Effect Vehicle, Sea Waves, Motion Control, Transport, Altitude Minimization, Flight Safety, Trajectory Optimization, Fuel Efficiency.

## References

1. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Problems, Theory and Systems of Automatic Control of Movement of Ekranoplans. *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniia VSPU-2014* [XII All-Russian Meeting on the Management Problems of the VSPU-2014], 2014, pp. 3391–3400 (In Russian).
2. Tofa M. M., Maimun A., Ahmed Y. M., Jamei S., Priyanto A., Rahimuddin. Experimental Investigation of a Wing-in-Ground Effect Craft. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, Article ID 489308, 7 p. doi:10.1155/2014/489308
3. Liang Yun, Alan Bliault, Johnny Doo. *WIG Craft and Ekranoplan: Ground Effect Craft Technology*. Springer, 2010. 443 p.
4. Pagowski Z. T., Szafran K. “Ground effect” Inter-Modal Fast Sea Transport. *TransNav. The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 317–320.
5. Pagowski Z. T., Szafran K., Kończak J. “Ground effect” Transport on the Baltic Sea, Maritime Transport & Shipping. *The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 221–234.
6. Wang H., Teo C. J., Khoo B. C., Goh C. J. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-InGround (WIG) Craft. *7th Asian-Pacific Conf. on Aerospace Technology and Science*, 2013, pp. 15–24.
7. Rozhdestvensky K. V. *Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect*. Springer Science & Business Media, 2000. 352 p.
8. Nebylov A. V. Prospects for Cooperation in New-Generation Alternate High Speed Water-Borne AirTransportation System Development. *AeroIndia International Seminar*, Bangalore, 2011, pp. 1–6.
9. Nebylov A. V., Nebylov V. A. Seaplane Landing Smart Control at Wave Disturbances. *18th IFAC World Congress*, Milano, 2011, pp. 3021–3026.
10. Bodner V. A. *Sistemy upravleniia letatel'nymi apparatami* [Control Systems for Aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 504 p. (In Russian).
11. Boroday I. K., Netsvetaev Yu. A. *Morekhnodnost' sudov* [Seaworthiness of Ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 287 p. (In Russian).
12. Galenin B. G., et al. *Veter, volny i morskije porty* [Wind, Waves and Seaports]. Ed. Yu. M. Krylov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 264 p. (In Russian).
13. Davydan I. N., Lopatukhin L. I., Rozhkov V. A. *Vetrovoe volnenie v mirovom okeane* [Wind Turbulence in the World Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 256 p. (In Russian).
14. Gurgendz A. T., Trapeznikov Yu. A., Rumyantseva S. A., et al. *Teoreticheskie osnovy i metody rascheta vetrovogo volneniia* [Theoretical Foundations and Methods for Calculating of Wind Waves]. Ed. I. N. Davydan. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 263 p. (In Russian).
15. Nebylov A. V., Nebylov V. A., Pierre Fabre. WIG-craft Flight Control above the Waved Sea. *Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace Vehicles ACNAAV 2015*, Seville, Spain, 2015, pp. 102–107.
16. Knyazhskiy A., Nebylov A., Nebylov V. Methods for Signal Processing and Motion Control of Ground Effect Vehicle. *4th IEEE Intern. Workshop on Metrology for Aerospace*, Padua, Italy, 2017, pp. 307–311.
17. Knyazhskiy A. Y., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Optimization of WIG-craft 3D-trajectory near the Rough Sea Surface. *European Conference for AeroSpace Sciences EUCASS*, Milan, Italy, 2017. Available at: <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-338.pdf> (accessed 10 October 2017).

УДК 004.93'1

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.29

# ВЛИЯНИЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДПИСАНТОВ НА БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РУКОПИСНЫХ ОБРАЗОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ВЕРИФИКАЦИИ

А. Е. Сулавко<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

А. Е. Самогуга<sup>а</sup>, аспирант

<sup>а</sup>Омский государственный технический университет, Омск, РФ

**Постановка проблемы:** статические биометрические образы не являются секретными и могут быть скопированы для изготовления муляжа, динамические рукописные образы можно держать в секрете, но они зависимы от психофизиологического состояния их владельца. **Цель исследования:** оценка зависимости рукописных образов от психофизиологического состояния подписантов и разработка способа верификации рукописных образов, устойчивого к изменениям состояния подписанта. **Результаты:** построена статистическая модель изменения параметров рукописных образов в зависимости от состояния подписанта, оценена информативность этих параметров для задач распознавания подписантов и их состояний. Предложен способ верификации субъектов по рукописному образу с вероятностью ошибок 1-го и 2-го рода 0,0014 и 0,0045. Проведена оценка влияния состояния подписанта на результаты его верификации при помощи меры хи-модуль, квадратичных форм, формулы гипотез Байеса и ее многомерного аналога. Предложен метод распознавания измененного состояния подписанта по рукописному образу со средней вероятностью ошибок 0,105 (без необходимости создания эталонов в измененном состоянии). Предложено использовать сети наибольшего правдоподобия Байеса — Хемминга, показывающие наилучшие результаты при распознавании подписантов в измененном состоянии. **Практическая значимость:** предложенный способ верификации субъектов по особенностям рукописного образа можно использовать на практике при реализации контрольно-пропускной функции или удаленной аутентификации.

**Ключевые слова** — параметры подписи, рукописный пароль, биометрия, широкие искусственные нейронные сети, квадратичные формы, алгоритмы распознавания образов, формула гипотез Байеса, распознавание психофизиологического состояния человека.

## Введение

В настоящее время идет борьба за надежность биометрических систем распознавания личности. Интерес к решению проблемы повышения надежности биометрической аутентификации обусловлен высокими финансовыми потерями от действий киберпреступников по всему миру. Имеющиеся оценки этих финансовых потерь по разным источникам составляют от 18–29 [1] до 375–575 [2] млрд долл. США в год.

Статические биометрические образы (отпечаток пальца, радужка, геометрия ладони и др.) имеют существенный недостаток — они не являются секретными. Этот недостаток нельзя исправить. Динамические биометрические образы (в частности, рукописного почерка) можно держать в тайне, тем самым существенно затрудняется их фальсификация. Однако биометрические данные этого типа обладают сравнительно меньшей информативностью, меняются с течением времени и в зависимости от психофизиологического состояния владельца [3]. Именно по этим причинам технологии аутентификации по динамическим биометрическим признакам пока не получили широкого распространения в реальной практике.

Настоящее исследование посвящено разработке метода верификации субъектов по рукопис-

ным образам, устойчивого в классе таких воздействий на подписанта, как интенсивная физическая нагрузка, прием алкоголя, успокаивающих средств седативного действия и кофеина, а также построению модели изменения параметров рукописного образа в зависимости от психофизиологического состояния подписанта.

## Параметры рукописных образов и результаты, полученные ранее

Надежность процедуры биометрической аутентификации характеризуется вероятностями ошибок 1-го и 2-го рода — ошибочного отказа в доступе «Своему» (False Recognition Rate — FRR) и ошибочного предоставления доступа «Чужому» (False Acceptance Rate — FAR). В рамках предыдущих исследований [4] авторами настоящей работы были получены следующие результаты по верификации субъектов по рукописным образам: FRR = 0,0126, FAR = 0,0083, — что существенно превосходит известные авторам достигнутые ранее результаты в этой области, резюмированные и приведенные в работах [5–7]. Для формирования тестовой и обучающей выборок привлекалось 60 испытуемых, которые осуществляли ввод автографа при помощи планшета фирмы Wacom, регистрирующего координаты  $x$ ,  $y$  и уровень дав-

ления  $p$  (в условных единицах от 0 до 1024) пера на планшет во времени  $t$ . Каждая подпись, представляющая собой функции  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $p(t)$ , преобразовывалась в вектор значений множества биометрических параметров (далее признаков), которые можно разделить на следующие группы:

1. Нормированные по энергии амплитуды наиболее низкочастотных гармоник функций давления  $p(t)$  и скорости пера  $v_{xy}(t)$  (диапазон анализируемых частот составлял 0,1–10 Гц, что соответствует движениям руки подписанта при воспроизведении рукописного образа) [8].

2. Коэффициенты корреляции между функциями координат пера  $x(t)$ ,  $y(t)$  и его давления на планшет  $p(t)$  [8].

3. Расстояния между некоторыми точками подписи в трехмерном пространстве (точки выбираются равномерно с некоторым шагом, далее находятся расстояния между всеми парами этих точек, третье измерение — давление пара на планшет) [8].

4. Значения функций  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $p(t)$  и  $v_{xy}(t)$  [8].

5. Характеристики изображения подписи: отношение длины подписи к ее ширине, центр подписи, угол наклона подписи, угол наклона между центрами половин подписи [8].

6. Коэффициенты вейвлет-преобразований Добеши по базису D6 функций  $v_{xy}(t)$  и  $p(t)$  (диапазон анализируемых частот 0,1–10 Гц) [8].

Предварительно функции  $x(t)$ ,  $y(t)$  и  $p(t)$  нормировались по длительности (приводились к единому количеству отчетов). Подробнее с методикой нормирования, описанными биометрическими признаками и использованными методами можно ознакомиться из работ [4, 6, 8–10]. Отметим лишь дополнительно, что законы распределения большинства указанных признаков близки к нормальному, некоторые признаки имеют лог-нормальное или двойное экспоненциальное распределение (распределение Лапласа) [6].

В работе [11] впервые предложен метод распознавания измененного (неадекватного) психофизиологического состояния подписанта по особенностям воспроизведения подписей в пространстве аналогичных признаков. Согласно одному из определений, психофизиологическое состояние (ПФС) — это совокупность свойств человека, отражающих биологические аспекты проявления адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды [12]. ПФС отражает специфику реагирования организма человека на ту или иную ситуацию [13]. Для изменения ПФС испытуемые в работе [11] подвергались физической нагрузке, принимали алкоголь, седативные успокаивающие средства и кофеин. По результатам экспериментов вероятность ошибочных решений метода составила в среднем для 60 подписантов 0,073 (среднеквадратическое отклонение вероятности

ошибки, полученной для различных испытуемых, составило 0,059). Обучение системы распознавания требовалось проводить для каждого испытуемого отдельно и с использованием подписей, воспроизведенных не только в нормальном состоянии, но и в измененном. По этой причине применение разработанного метода на практике оказалось затруднительным. Тем не менее было показано, что приведенные выше признаки содержат информацию не только о подписанте, но и об изменениях, происходящих на психологическом и физиологическом уровнях функционирования субъекта.

### Формирование базы рукописных образов подписантов, находящихся в различных психофизиологических состояниях

Проведен эксперимент по формированию базы рукописных подписей (автографов) с привлечением 110 испытуемых, вводимых поочередно в различные ПФС. Неврологический статус всех испытуемых до начала эксперимента оценивался как нормальный. Подтверждение «перехода» в соответствующее ПФС осуществлялось на холтеровском мониторе «Кардиотехника-04». При изменении ПФС менялась частота сердечных сокращений (ЧСС). Получено минимум по 50 подписей от каждого испытуемого в каждом из следующих состояний:

1. Нормальное (или адекватное) состояние, при котором субъект не подвергался каким-либо воздействиям, в том числе психическим или физическим нагрузкам. Эксперимент проводился в начале рабочего дня после полноценного отдыха в предшествующие сутки. В данном состоянии наблюдаются наилучшие результаты деятельности индивидуума [14].

2. Возбуждение характерно для человека, сконцентрированного на решении ответственной задачи. Данное состояние представляет собой общую физиологическую и психологическую активизацию организма человека, уровень которого может колебаться от состояния абсолютного покоя (кома) до состояния полного возбуждения (маниакальное возбуждение). Для сильно возбужденных людей характерна психическая активность, повышенная ЧСС, учащенное дыхание и обильное потоотделение [15]. Перед началом эксперимента участник принимал кофе, что повышало ЧСС в среднем на 10 %.

3. Усталость после физической нагрузки, характеризуется учащением ЧСС на 10–30 %. Для получения нужного эффекта испытуемые подвергались интенсивной физической нагрузке, минимальный объем которой определялся методом Мартине (20 приседаний за 30 с) и далее варьировался в зависимости от пола и возраста.

4. Расслабленное (сонное) состояние, характеризующееся легкой сонливостью, низкой продуктивностью. Для имитации данного состояния участники принимали успокаивающие естественные растительные средства седативного действия, к которым относится пустырник, мята, валериана, и прослушивали успокаивающую музыку. ЧСС возвращалась к значениям в состоянии покоя, либо происходило снижение ЧСС на 3–5 %.

5. Опыание. Испытуемый принимал алкоголь, дозировка рассчитывалась по формуле Видмарка

$$c = \frac{A}{mr}, \quad (1)$$

где  $c$  — концентрация алкоголя в крови, ‰;  $A$  — масса выпитого напитка, г;  $m$  — масса тела, кг;  $r$  — коэффициент Видмарка (0,7 — для мужчин, 0,6 — для женщин).

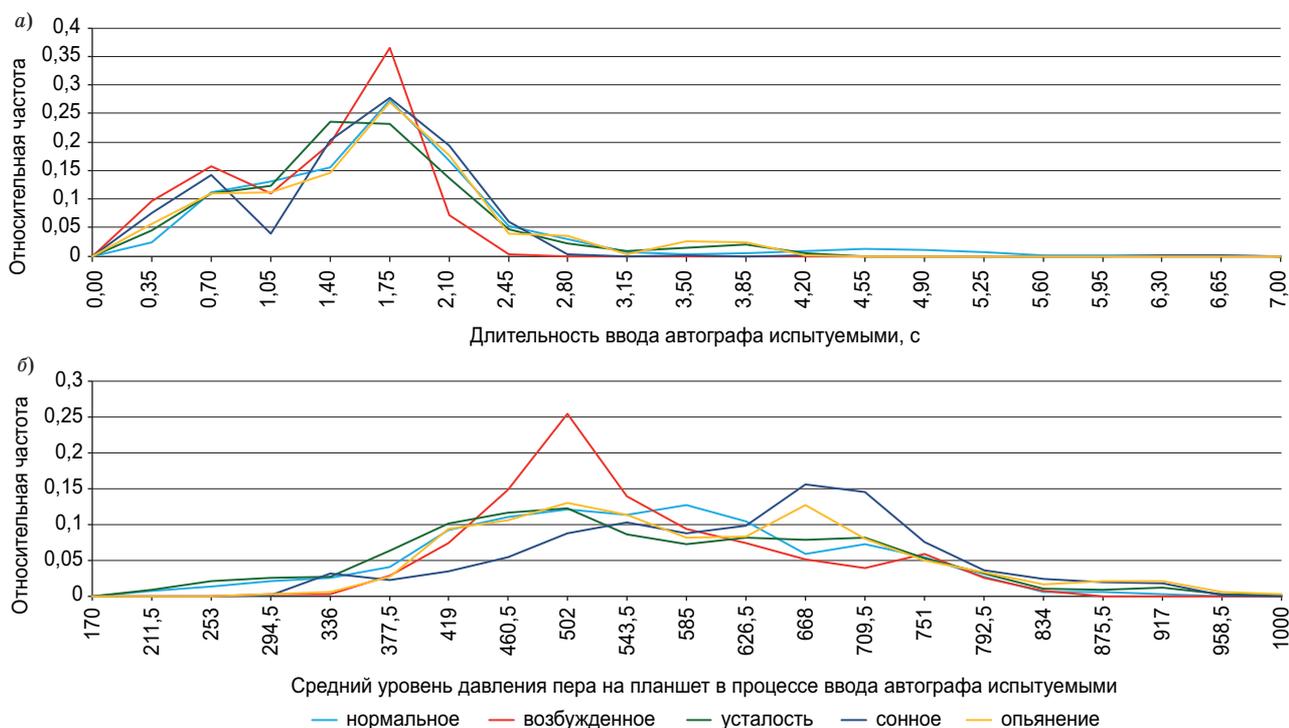
Масса выпитого соответствовала такому количеству алкоголя, для которого значение концентрации в крови было не менее 0,5 ‰. Данный уровень опыания выбран исходя из критериев, предлагаемых для определения степени выраженности алкогольной интоксикации В. И. Прозоровским и другими [16]. Согласно принятой схеме, при меньшей концентрации отсутствует влияние алкоголя

на организм. Данный уровень приводит к статистически значимым изменениям вариабельности сердечного ритма [17, 18].

Введем понятие «измененного» ПФС субъекта. К рукописным образам, полученным от субъектов, находящихся в измененном состоянии, будем относить образцы, которые введены испытуемыми в любом состоянии, отличающемся от нормального. Для каждого испытуемого, находившегося в определенном ПФС, сформирован отдельный эталон рукописного образа, состоящий из математических ожиданий и среднеквадратических отклонений значений признаков, вычисленных из соответствующих образцов.

### Изменение скорости и давления пера на планшете при вводе автографа и стабильность его написания в зависимости от ПФС подписанта

Выявлены статистические изменения средней скорости написания автографа субъекта, зависящие от его состояния (рис. 1, а и б). В измененном ПФС субъект обычно тратит меньше времени  $T$  на ввод автографа, т. е. при смене ПФС скорость воспроизведения автографа в среднем возрастает (кроме состояния опыания, таблица). Данные изменения лучше всего просматриваются в сон-



■ **Рис. 1.** Относительные частоты времен ввода подписи (а) и уровней давления пера на планшет (б) в зависимости от ПФС подписанта

■ **Fig. 1.** Relative frequencies of signature input times (а) and pen pressure levels (б) depending on the psychophysiological state of signer

- Изменение времени ввода подписи  $T$  и давления пера на планшет  $p$  в зависимости от ПФС подписанта ( $\Delta E(.)$  и  $\Delta \sigma(.)$  — наблюдаемые приращения соответствующих величин при изменении нормального состояния на другое)
- Changing the time of signature input  $T$  and the pen pressure on a tablet  $p$  depending on the psychophysiological state of signer ( $\Delta E(.)$  and  $\Delta \sigma(.)$  — are observed increment of corresponding values when the normal state changes to another)

Состояние	$E(T)$ , с	$\sigma(T)$ , с	$\Delta E(T)$ , %	$\Delta \sigma(T)$ , %	$E(p)$ , уровень	$\sigma(p)$ , уровень	$\Delta E(p)$ , %	$\Delta \sigma(p)$ , %
Нормальное	1,4783	0,8859	Нет	Нет	529,366	104,309	Нет	Нет
Возбуждение	1,1451	0,434	-22,5	-51,1	527,41	82,626	-0,37	-20,8
Усталость	1,44	0,5288	-2,2	-40,3	527,311	121,54	-0,39	+16,5
Сонное	1,3517	0,505	-8,5	-43	600,969	105,408	+13,5	+1,05
Опьянение	1,4825	0,5582	+0,3	-37	570,652	111,767	+7,8	+7,15



- **Рис. 2.** Относительные частоты коэффициентов корреляции между функциями давления пера на планшет в зависимости от ПФС подписантов
- **Fig. 2.** Relative frequencies of correlation coefficients between pen pressure functions depending on the psychophysiological state of signers

ном и возбужденном состоянии — повышается доля подписей со временем ввода менее 1 с (см. рис. 1). В состоянии возбуждения скорость ввода подписей в среднем повысилась на 22,5 %.

Площади пересечения эмпирических плотностей вероятностей времен ввода подписей (среднего давления пера на планшет) испытуемыми в нормальном состоянии с аналогичными плотностями, относящимися к измененным ПФС, характеризуют увеличение вероятности возникновения сбоев — некорректного воспроизведения автографа вследствие изменения ПФС подписанта [19, 20].

В любом измененном состоянии время  $T$  ввода автографа субъектом стабилизируется (средне-квадратическое отклонение  $\sigma(T)$  снижается до 51,1 %, см. таблицу). Сила нажатия на кончик пера (давление пера на планшет) при воспроизведении автографа в среднем увеличивается на 13,5 и 7,8 %, если подписант находится в сонном ПФС или состоянии опьянения соответственно (см. таблицу).

При изменении ПФС подписанта наблюдается повышение корреляции между функциями давления  $p(t)$  (рис. 2), т. е. стабильность воспроизведения  $p(t)$  возрастает.

Полученные результаты можно отнести к категории неожиданных.

### Информативность биометрических признаков

Под информативностью признака в общем случае понимается то, насколько хорошо он подчеркивает различия между распознаваемыми объектами. Чем выше информативность признака, тем с меньшей вероятностью ошибки он позволяет разделить классы образов. Сумма вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода (вероятность любой ошибки) распознавания двух образов по определенному признаку стремится к площади пересечения функций плотностей вероятности значений этого признака, характеризующей соответствующие классы (образы). В соответствии с законом больших чисел эта оценка тем точнее, чем больше значений признака использовалось при построении функций плотности вероятности. Известны различные подходы количественного измерения информативности признака [20–22]. Однако независимо от подхода исследователи ориентируются на данные площади. Например, в работе [21] информативность признака определяется в битах

как отрицательный логарифм по основанию 2 от площади пересечения функции плотности вероятности признака, характеризующей образ «Свой», с функцией плотности вероятности этого же признака, характеризующей образ «Все чужие». В настоящем исследовании применялся подход на базе оценки парных площадей пересечения плотностей вероятности признаков [22].

Для каждого  $j$ -го признака вычислены параметры распределения (по имеющимся подписям). На области значений каждого признака  $a_j$  построены функции плотностей вероятности  $f_{ik}(a_j)$ , характеризующие  $i$ -го подписанта, находящегося в  $k$ -м состоянии. Информативность каждого признака оценивалась для двух задач: распознавание субъектов, находящихся в определенном состоянии, и их ПФС. В первом случае для каждого  $k$ -го состояния вычислялись площади пересечения между всеми имеющимися парами  $f_{lk}(a_j)$  и  $f_{ik}(a_j)$ , во втором случае — для каждого  $i$ -го испытуемого между  $f_{i1}(a_j)$  и  $f_{ik}(a_j)$ , где  $l, i = 1..n$ ,  $l \neq i$ ,  $l$  и  $i$  — номера испытуемых;  $k = 1..5$ ,  $k$  — номера ПФС (начиная с «нормального»)  $i$ -го испытуемого;  $n$  — количество испытуемых. Построены графики математических ожиданий  $M_{\text{ПФС}}$  и среднеквадратических отклонений  $S_{\text{ПФС}}$  соответствующих площадей  $Sq(a_j)$ , характеризующих информативность различных групп признаков для задачи распознавания подписантов, находящихся в определенном ПФС (рис. 3, а), а также информативность признаков для задачи распознавания определенных ПФС (рис. 3, б). Чем меньше  $M_{\text{ПФС}}$ , тем информативнее признак в целом (в среднем для всех испытуемых), чем выше  $S_{\text{ПФС}}$ , тем больше различие в информативности признака для испытуемых.

Как видно из рис. 3, для задачи распознавания субъектов информативность исследуемых признаков значительно выше, чем для задачи распознавания их состояний. Информативность каждого признака для задачи распознавания измененных ПФС примерно одинакова (см. рис. 3, б), исключение составляет признак «центр подписи по оси  $x$ », который гораздо лучше характеризует состояние возбуждения, чем остальные ПФС. С точки зрения распознавания ПФС признаки можно ранжировать в следующем порядке (начиная от наиболее информативных, заканчивая наименее): вейвлет-коэффициенты Добеши, статические признаки, коэффициенты корреляции между функциями рукописного образа, расстояния между его точками, амплитуды гармоник  $v_{xy}(t)$  и  $p(t)$ . Значения  $S_{\text{ПФС}}$  для разных ПФС близки. Динамика изменения  $S_{\text{ПФС}}$  в зависимости от  $j$  для рассматриваемых задач схожа (поэтому на рис. 3, б  $S_{\text{ПФС}}$  не приводятся).

С точки зрения распознавания подписантов наиболее информативными также являются вейв-

лет-коэффициенты Добеши (см. рис. 3, а), однако различия в информативности между остальными признаками не настолько существенны. Значения  $S_{\text{ПФС}}$  для разных состояний примерно равны, поэтому не приводятся на рисунке. Наименее информативными являются амплитуды высокочастотных гармоник функции скорости пера на планшете  $v_{xy}(t)$ . В целом информативность амплитуд снижается с увеличением частоты соответствующих гармоник, что вполне логично (чем выше частота, тем ниже соотношение сигнал/шум, информативная частота колебаний руки подписанта находится преимущественно в интервале 0,1–10 Гц [11]). Информативность расстояний между точками рукописного образа снижается по мере удаления точек друг от друга (см. рис. 3). Соседние точки подписи с координатами  $O_g(x(t_g); y(t_g))$  и  $O_{g+1}(x(t_{g+1}); y(t_{g+1}))$  характеризуют скорость пера на планшете, однако расстояния между точками, расположенными на большем удалении друг от друга ( $\Delta g > 1$ ), характеризуют также внешний вид рукописного образа.

В измененных ПФС информативность большинства признаков для задачи распознавания подписантов существенно не меняется, за исключением расстояний между точками с учетом давления (в возбужденном ПФС их информативность заметно снижается) и коэффициентов вейвлет-преобразования Добеши. Информативность коэффициентов Добеши при изменении состояния подписанта увеличивается, что явно прослеживается для функции  $v_{xy}(t)$ , когда подписант находится в состоянии усталости или опьянения, а также для функции  $p(t)$  при опьянении. Этот результат согласуется с тем, что корреляция между реализациями функции  $p(t)$  при изменении ПФС подписанта возрастает, особенно для состояния опьянения (см. рис. 2), стабильность времени воспроизведения автографа подписантом также повышается (см. таблицу) в измененных состояниях. Однако не все закономерности удается объяснить, так как характер зависимостей между признаками сложный. Из представленного рис. 4, а и б видно, что почти все признаки коррелируют, но стопроцентной зависимости между ними нет. В основном зависимость слабая или умеренная (по шкале Чеддока). Однако у различных испытуемых встречаются сильно зависимые признаки. Характер взаимной коррелированности признаков для различных образов и подписантов разный и меняется при смене состояния.

Каждый из рассмотренных признаков информативен ( $M_{\text{ПФС}} < 0,9$  для любого ПФС) для рассматриваемых задач, но для всех подписантов в различной степени. Линейно зависимых признаков нет. По этой причине стоит использовать для распознавания субъектов и их состояний все

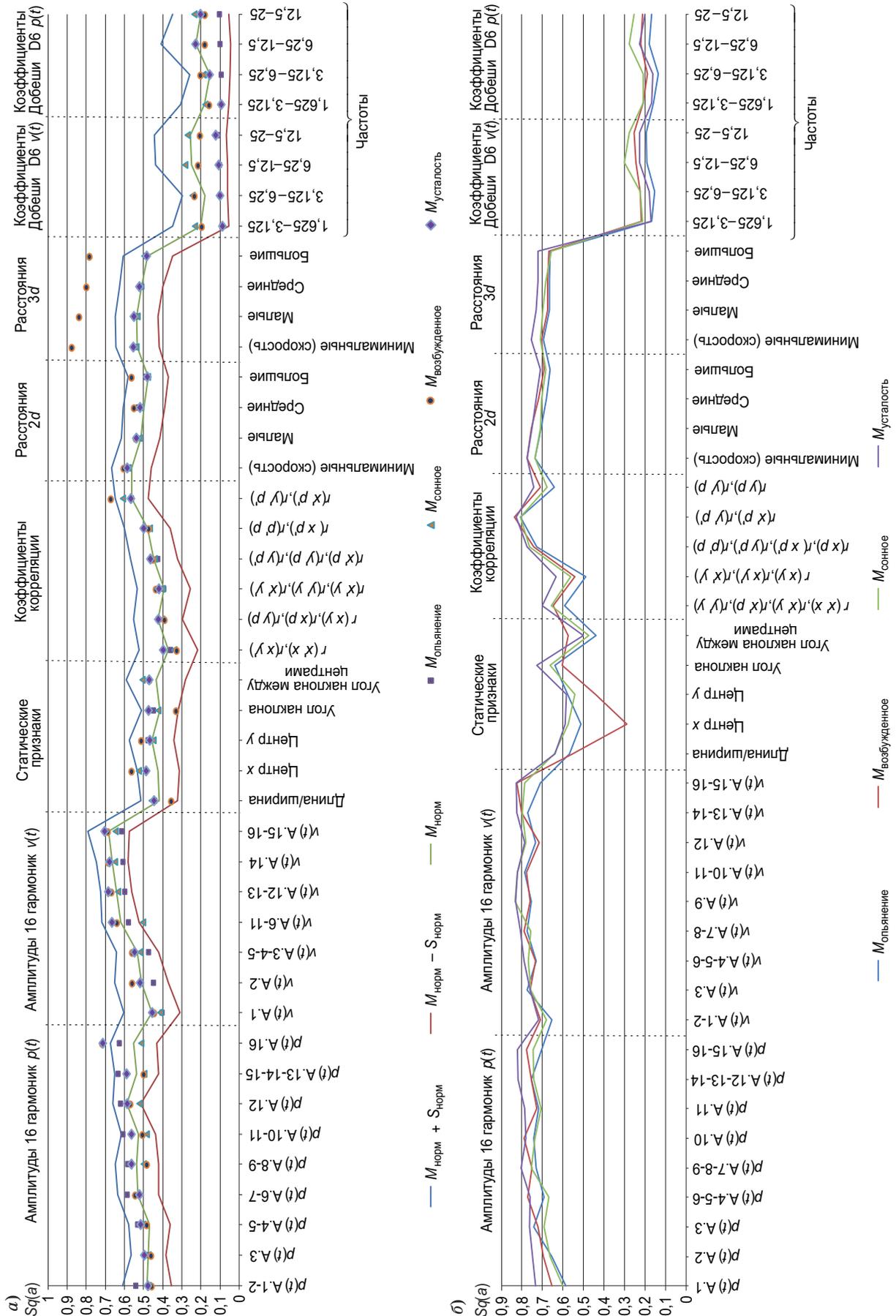
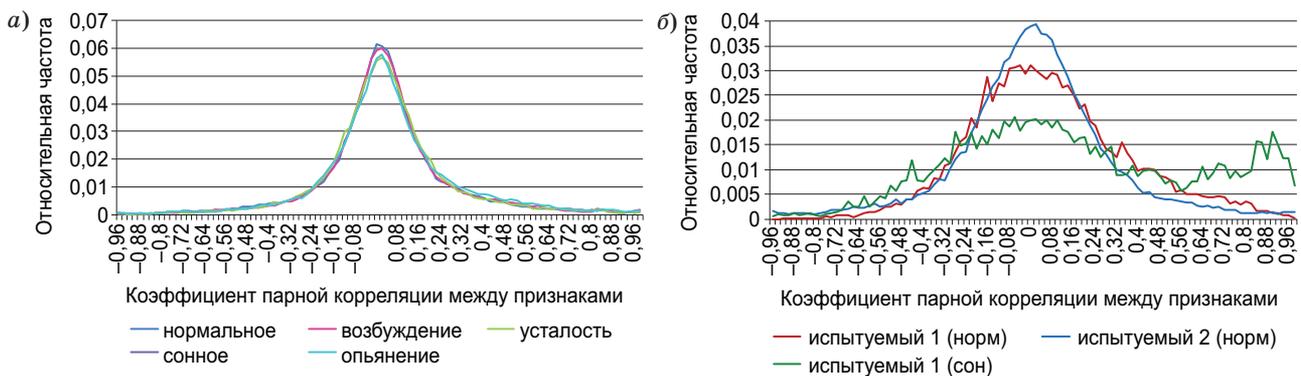


Рис. 3. Информативность признаков для распознавания подписантов (а) и ПФС (б)  
 Fig. 3. Feature informativeness for recognition of signers (a) and psychophysiological state (б)



■ **Рис. 4.** Взаимная зависимость между признаками субъектов, находящихся в различных ПФС, для всех испытуемых (а) и для двух испытуемых (б)  
 ■ **Fig. 4.** Mutual dependence between features of subjects in different states for all subjects (a) and for two subjects (б)

доступные признаки, подбирая индивидуально для каждого подписанта оптимальные параметры классификатора.

**Верификация подписантов с учетом ПФС на базе широких нейронных сетей. Устойчивость функционалов искусственных нейронов к изменению ПФС подписанта**

В работе [4] наилучшие результаты по верификации подписантов достигаются с использованием сетей квадратичных форм, настраиваемых при помощи адаптированного алгоритма обучения персептронов из ГОСТ Р 52633.5-2011. Данный алгоритм применяется для вычисления весовых коэффициентов взвешенных мер Евклида, на основе которых строились нейроны однослойной искусственной нейронной сети; также хорошие результаты удалось достигнуть при использовании сетей из нейронов на базе метрик Пирсона и хи-модуль:

$$\varepsilon^2 = \sum_{j=1}^n \mu_j (m_j - a_j)^2; \tag{2}$$

$$\theta = \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{(m_j - a_j)^2}{\sigma_j^2}}; \tag{3}$$

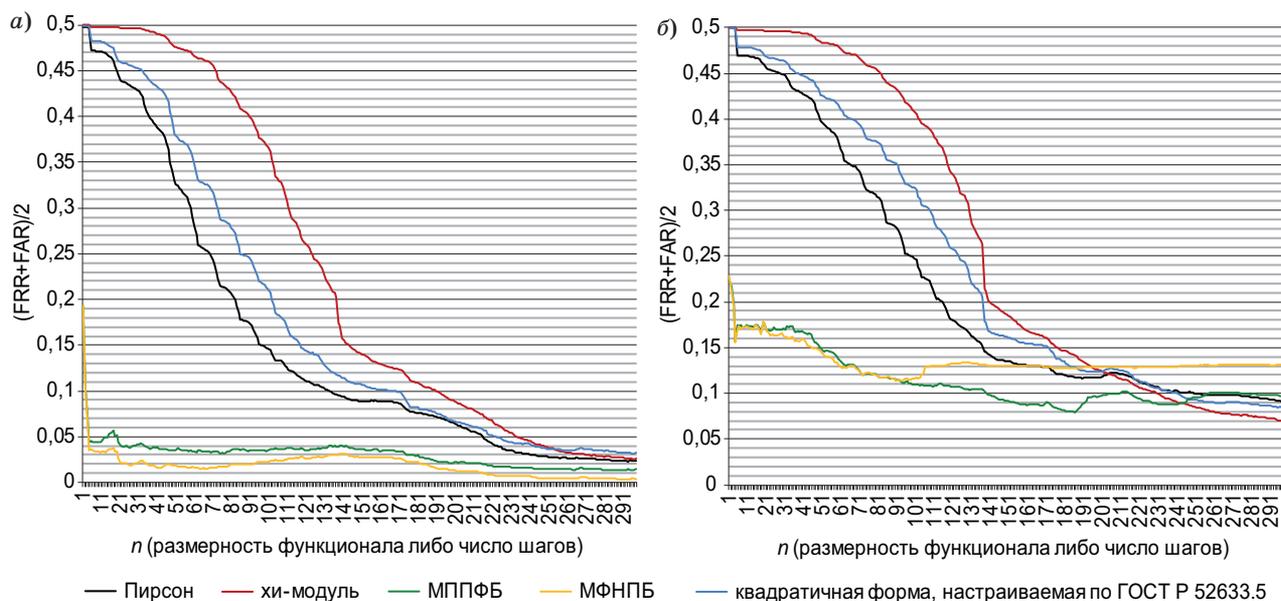
$$\chi = \sum_{j=1}^n \frac{|m_j - a_j|}{\sigma_j}, \tag{4}$$

где  $\mu_j$ ,  $m_j$ ,  $a_j$  и  $\sigma_j$  — весовой коэффициент, математическое ожидание, значение и среднеквадратическое отклонение  $j$ -го признака (входа нейрона) соответственно;  $n$  — число признаков (входов нейрона). Повышать размерность  $n$  функционала нейрона до бесконечности не имеет смысла, так как вероятность ошибочных решений снижается только до попадания на так называемый «уча-

сток насыщения» [4] (когда общая информативность признаков с учетом их взаимной коррелированности превышает количество информации на выходе функционала [21]). После этого снижения числа ошибок удается добиться, если объединить функционалы в искусственную нейронную сеть с одним скрытым слоем нейронов. Каждый нейрон строится на базе какого-либо функционала и квантует данные на его выходе (преобразуя их в «0» или «1», подтверждая или опровергая аутентичность образа). Принимать решение стоит по оптимальному расстоянию Хемминга, подсчитывая общее количество единиц и сравнивая его с порогом. Можно увеличивать численность нейронов без повышения вероятности ошибки, но это имеет смысл, пока нейроны ошибаются по-разному, т. е. каждый из нейронов должен быть уникальным (строиться на основе разных функционалов или принимать на вход отличающиеся сочетания признаков) [4, 21]. Такие сети называют «широкими». Сети Пирсона — Хемминга, хи-модуль, Евклида — Хемминга легко обучить, достаточно вычислить параметры распределения биометрических признаков из предоставленных обучающих примеров. Недостаток данных метрик заключается в том, что они работоспособны, если корреляционная зависимость между признаками слабая или отсутствует [23]. При существенном увеличении корреляции между признаками происходит эффект накопления ошибок.

Метод последовательного применения формулы гипотез Байеса [11] (МППФБ) или ее модифицированного варианта [20] показал достаточно высокие результаты в ряде задач биометрической идентификации [6, 9, 11, 20, 22]:

$$P(H_h | A_j) = \frac{P(H_h | A_{j-1})P(A_j | H_h)}{\sum_{h=1}^n P(H_h | A_{j-1})P(A_j | H_h)}, \tag{5}$$



■ **Рис. 5.** Вероятности ошибок верификации подписантов в нормальном (а) и в измененном (б) ПФС с помощью различных функционалов  
 ■ **Fig. 5.** Probabilities of signers verification errors in normal state (a) and altered state (b) that are calculated using different functionals

где  $P(H_h|A_j)$ ,  $P(A_j|H_h)$  — соответственно апостериорная и условная вероятность  $h$ -й гипотезы, зависящая от  $j$ -го признака. Данный метод не теряет мощности при появлении сильно коррелирующих признаков [23] и заключается в вычислении за некоторое число шагов  $n$  (формула Байеса применяется многократно) апостериорных вероятностей гипотез, каждая из которых ассоциирована с определенным эталоном образа. В настоящей работе учитывалось две гипотезы: «Свой» ( $h = 1$ , при обучении формировался эталон распознаваемого испытуемого из 21 образца его подписи, как в ГОСТ Р 52633.5, полученных в нормальном ПФС) и «Чужой» ( $h = 2$ , при обучении формировался эталон неизвестного испытуемого из подписей других испытуемых, полученных в нормальном ПФС по одной от каждого субъекта). Таким образом, метод применялся для верификации образов каждого испытуемого. В качестве условных вероятностей использовались соответствующие плотности вероятности значений признаков ( $P(A_j|H_h) = f_h(a_j)$ ). На каждом  $j$ -м шаге за априорную вероятность принималась апостериорная вероятность, вычисленная на предыдущем шаге. На первом шаге гипотезы обычно считаются равновероятными, если нет статистических данных относительно них [3, 11, 20], в настоящей работе придерживались данного правила. Решение принималось в пользу гипотезы с наивысшей апостериорной вероятностью на последнем шаге. Определена устойчивость метрик к изменению ПФС верифицируемых субъектов. Для этого при распо-

знании использовались подписи, полученные от подписантов в измененных ПФС, но обучающие данные соответствовали нормальному состоянию во всех случаях (рис. 5, а и б).

В работе [23] предложено повышать размерность формулы Байеса, учитывая за один шаг информацию о нескольких признаках (плотности вероятности  $f_h(a_j)$  нескольких признаков  $a_j$  на каждом шаге необходимо перемножать, воспринимая их как вероятности одновременного возникновения независимых событий  $A_j$ ). При повышении размерности  $n$  многомерного функционала наибольшего правдоподобия Байеса (МФНПВ) появляется множество вариантов его записи:

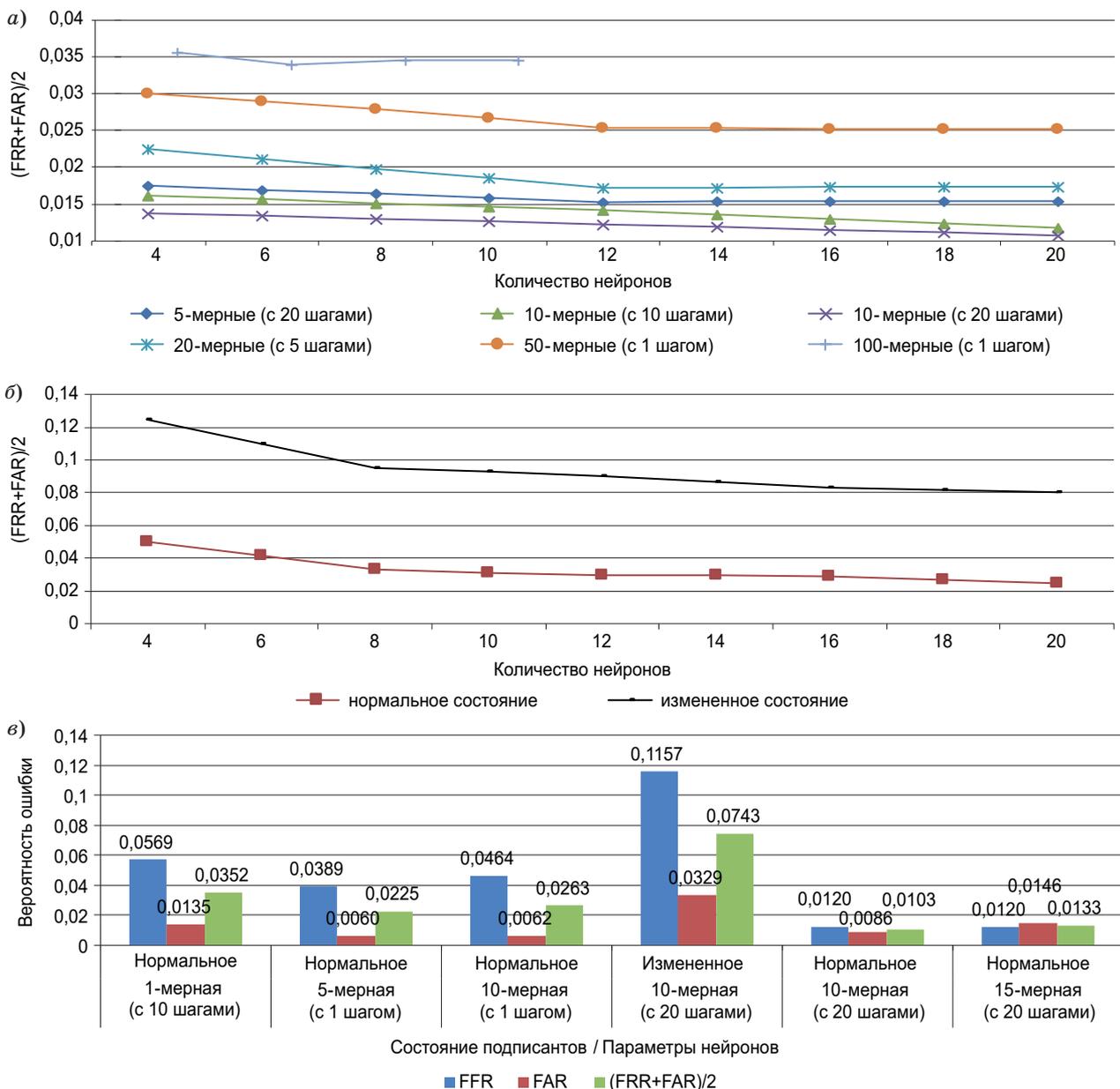
$$P(H_h | A_s) = \frac{P(H_h | A_{s-1}) \prod_{x=1}^n f_h(a_{j(s,x)})}{\sum_{h=1}^n (P(H_h | A_{s-1}) \prod_{x=1}^n f_h(a_{j(s,x)}))}, \quad (6)$$

где  $j(s, x)$  — номер признака, который больше не совпадает с номером шага  $s$ , но зависит от него. На каждом шаге целесообразно использовать уникальные сочетания из  $n$  неповторяющихся признаков. В общем случае количество возможных неповторяющихся шагов последовательного применения  $n$ -мерного функционала (6) равно числу сочетаний без повторов  $C_\eta^n$  из  $\eta$  по  $n$ , где  $\eta$  — общее количество признаков ( $n \leq \eta$ ). Например, при наличии 100 признаков можно сформировать 17 310 309 456 440 различных 10-мер-

ных функционалов наибольшего правдоподобия Байеса.

Предлагается конструировать  $N$  нейронов на основе различных сочетаний неповторяющихся шагов, в основе которых лежит функционал (6). Такой подход может быть значительно эффективнее, чем повторение  $\eta$  раз двумерного правила Байеса (5) или однократное применение  $\eta$ -мерного функционала (6), если найти оптимальные параметры нейронов (число шагов и размерности). В частности, сеть наибольшего правдоподобия

Байеса — Хемминга выгодно использовать в тех случаях, когда обучающая выборка значений признаков недостаточно репрезентативна (не отражает в полной мере свойства распознаваемых объектов), как в случае, когда состояния подписантов на этапе создания эталона и верификации не одинаковы (рис. 5 и 6,  $a$ – $в$ ). Число шагов и размерность функционала (6) не являются эквивалентными параметрами и дополняют алгоритм принятия решений. Из рис. 6 видно, что повышать размерность не всегда выгодней, чем количество шагов.



■ **Рис. 6.** Вероятности ошибок верификации подписантов сетями наибольшего правдоподобия Байеса — Хемминга со следующими условиями: *a* — нормальное ПФС, разные параметры нейронов; *б* — разные ПФС, 10-мерные (с шагом 1) нейроны; *в* — разные ПФС, 300 нейронов с различными параметрами

■ **Fig. 6.** Probabilities of signers verification errors by maximum likelihood Bayes — Hamming networks with the following conditions: *a* — normal state, different parameters of neurons; *б* — different states, 10-dimensional (in increments of 1) neurons; *в* — 300 neurons with different parameters

Все функционалы теряют мощность, если состояния подписантов на этапах обучения и распознавания не совпадают (это эквивалентно снижению репрезентативности обучающей выборки), потери мощности тем выше, чем выше их размерность. Вероятность ошибки в среднем возрастает: для функционала Пирсона на 103 %, для хи-модуль на 49 %, для квадратичной формы с обучением по ГОСТ Р 52633.5 на 73 %, для МППФБ на 326 %, для МФНПБ на 1077 %. Таким образом, самым устойчивым функционалом является мера хи-модуль. Если объединить функционалы в сеть, устойчивость сети зависит от их размерностей.

Наилучший результат по верификации подписантов получен с использованием всех расщепленных признаков и применением многомерных функционалов Байеса (6) и превосходит достигнутый ранее уровень:  $FRR = 0,0014$ ,  $FAR = 0,0045$ . Но данные показатели достигаются при условии строгого совпадения ПФС подписантов на этапе создания эталона и распознавания.

#### Статистическая модель изменения признаков рукописных образов в зависимости от психофизиологического состояния подписанта

Проведен анализ эталонов рукописных образов подписантов, находящихся в различных состояниях. Выявлено, что изменения большинства признаков при переходе от нормального состояния подписанта к любому другому ПФС имеют схожий характер (значения определенных признаков синхронно возрастают, а других — наоборот синхронно снижаются) и достаточно стабильны (рис. 7, а). Однако у испытуемых эти изменения могут проявляться в различной степени. Некоторые признаки в зависимости от состояния меняются по-разному (рис. 7, б). Также малая часть признаков меняется хаотично (к ним относятся некоторые коэффициенты вейвлет-преобразований Добеши).

Выдвинута гипотеза: возможно осуществить преобразование эталона рукописного образа, сформированного в «нормальном» состоянии подписанта, к эталону этого же образа, сформированного в «измененном» состоянии подписанта, с достаточной точностью, чтобы использовать полученный эталон для последующего распознавания этих состояний со средней вероятностью ошибок, существенно не превышающей достигнутую в работе [11] (0,073), при условии применения аналогичных с [11] методов. Приведение эталона к нужному виду предлагается осуществлять, отбросив признаки, изменения которых при смене ПФС носят хаотичный характер, по формулам

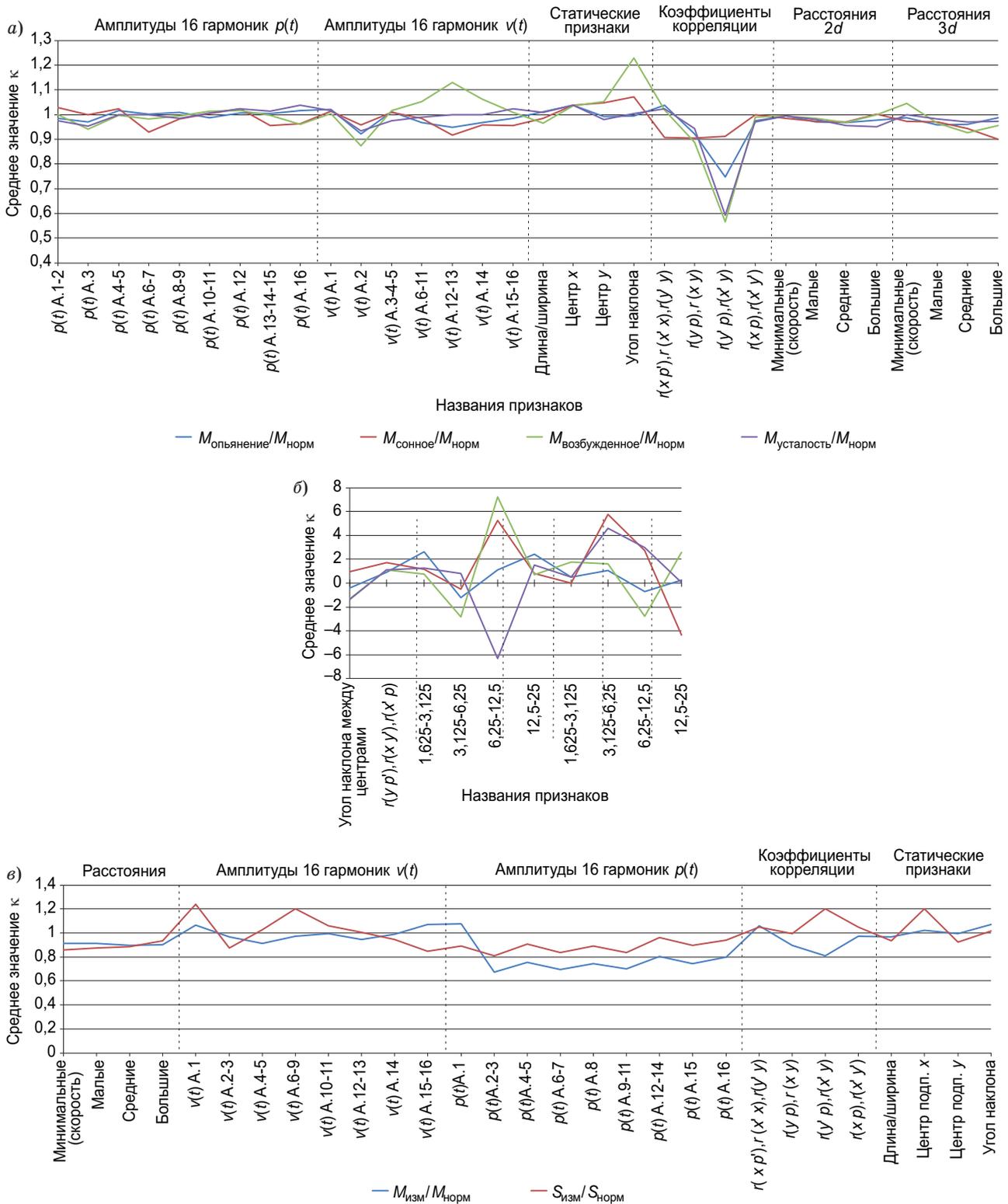
$$\begin{aligned} E'_и &= [m'_{и1} \quad \dots \quad m'_{ин}] = E_и \times K_m = \\ &= [m_{и1} \quad \dots \quad m_{ин}] \times \begin{bmatrix} k_{m1} \\ \dots \\ k_{mn} \end{bmatrix} \approx E_и = \\ &= [m_{и1} \quad \dots \quad m_{ин}]; \\ \Theta'_и &= [\sigma'_{и1} \quad \dots \quad \sigma'_{ин}] = \Theta_и \times K_s = \\ &= [\sigma_{и1} \quad \dots \quad \sigma_{ин}] \times \begin{bmatrix} k_{\sigma 1} \\ \dots \\ k_{\sigma n} \end{bmatrix} \approx \Theta_и = \\ &= [\sigma_{и1} \quad \dots \quad \sigma_{ин}], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $E_и$  и  $E_н$  — матрицы математических ожиданий признаков субъекта в измененном и нормальном состоянии соответственно;  $\Theta_и$  и  $\Theta_н$  — матрицы среднеквадратических отклонений признаков субъекта в измененном и нормальном состоянии соответственно;  $K_m$  и  $K_s$  — матрицы поправочных коэффициентов для математических ожиданий и среднеквадратических отклонений соответственно;  $n$  — количество признаков.

Были определены поправочные коэффициенты параметров эталона подписанта в нормальном состоянии, которые образуют векторы перехода к эталону в измененном состоянии. Данные коэффициенты позволяют получить эталон подписанта, находящегося в состоянии, условно названном «измененное», без необходимости предварительного ввода подписей в этом состоянии на этапе обучения системы. Описания признаков, показывающих схожие изменения в зависимости от ПФС (см. рис 7, а и б), в эталоне измененного состояния субъекта представлены единым распределением. Признаки, показывающие различный характер изменений в зависимости от ПФС (см. рис. 7, б), в эталоне измененного состояния представлены в виде смеси распределений, каждое из которых характеризует подписанта в определенном ПФС.

Назовем преобразованный эталон, состоящий из матриц  $E'_и$  и  $\Theta'_и$ , синтетическим.

Проведен вычислительный эксперимент по распознаванию ПФС. Для формирования решений задействован метод последовательного приращения двумерной (обычной) формулы гипотез Байеса (5) аналогично тому, как это выполнялось в работе [11], и  $\eta$ -мерный функционал (6). Использовались две гипотезы, ассоциированные с эталоном нормального и измененного состояния. Вероятность ошибки распознавания состояний при использовании синтетических эталонов измененного ПФС превысила аналогичную оценку из работы [11] (0,073, которая получена с использованием эталонов, сформированных из естественных образов) на 62 % (0,118) и 45 % (0,105) при использовании соответственно функционала



■ **Рис. 7.** Коэффициент изменения признаков  $\kappa$  при переходе: *а* — в состояния опьянения, сна (глубокого расслабления), усталости, возбуждения (признаки со схожим характером изменений); *б* — в состояния опьянения, сна (глубокого расслабления), усталости, возбуждения (признаки с различным характером изменений); *в* — в измененное состояние (признаки со схожим характером изменений)

■ **Fig. 7.** The coefficient of change in the signs of  $\kappa$  in the transition: *a* — in a state of intoxication, sleep (deep relaxation), fatigue, excitement (signs with a similar nature of changes); *б* — into intoxication, sleep (deep relaxation), fatigue, excitement (signs with different patterns of changes); *в* — in an altered state (signs with a similar nature of changes)

(5) и (6). Несмотря на то что погрешность вероятностей существенная, для большинства признаков и испытуемых все-таки выполняются приближенные равенства:  $m_{ij} \approx m_{nj}k_{mj}$ ,  $\sigma_{ij} \approx \sigma_{nj}k_{oj}$ . Поэтому данный результат можно назвать удовлетворительным и заключить, что построенная статистическая модель упрощенно описывает изменения параметров рукописных образов, которые происходят при употреблении подписантом алкоголя, кофеина или успокоительных, а также после физической нагрузки.

Для повышения надежности распознавания ПФС субъектов по рукописным образам методику принятия решений можно модифицировать, в частности, по аналогии с тем, как это выполнялось в предыдущем разделе. Однако это является темой отдельного исследования и выходит за рамки статьи.

### Заключение

Установлено, что после физической нагрузки, принятия снотворного или кофеина скорость воспроизведения автографа субъектом возрастает. После принятия снотворного и алкоголя сила нажатия на кончик пера в среднем увеличивается на 13,5 и 7,8 % соответственно. При изменении ПФС подписанта повышается стабильность воспроизведения функций давления пера на планшет и времени ввода подписи.

Проведена оценка информативности признаков для задач верификации подписантов и распознавания измененного ПФС. Наиболее информативными являются коэффициенты вейвлет-преобразования Добеши. Почти все признаки коррелируют, линейно зависимых признаков нет. Характер взаимной коррелированности признаков для различных образов и подписантов разный и меняется при смене ПФС. Каждый из рассмотренных признаков информативен для рассматриваемых задач, но для всех подписантов в различной степени.

Предложен способ верификации подписантов на основе многомерных функционалов наибольшего правдоподобия Байеса с вероятностью ошибок 1-го и 2-го рода 0,0014 и 0,0045 (при условии нахождения подписантов в нормальном ПФС). Для сохранения высокой надежности верификации образов субъектов по воспроизводимому ими паролю или подписи требуется обеспечить совпадение ПФС подписанта на этапе создания эталона и распознавания либо применять сети наибольшего правдоподобия Байеса — Хемминга. Поиск оптимальных параметров (количества шагов и размерности) нейронов на базе функционалов Байеса (6) является темой отдельного исследования. Число нейронов целесообразно повышать до максимально возможного исходя из доступных вычислительных ресурсов. Такой подход потенциально эффективнее, чем многократное повторение двумерного правила Байеса (5) или однократное применение его многомерного аналога (6).

Все функционалы (квадратичные формы, хи-модуль, формула Байеса и ее многомерный аналог) теряют мощность, если состояния подписантов на этапах обучения и распознавания не совпадают, потери возрастают при повышении их размерности. Наиболее устойчива мера хи-модуль (зарегистрирован рост числа ошибок в 1,49 раз), наименее — многомерный функционал наибольшего правдоподобия Байеса (рост числа ошибок в 11,77 раз).

Предложена статистическая модель изменения признаков рукописного образа в зависимости от ПФС подписанта, позволяющая преобразовать его эталон, сформированный в нормальном ПФС, к эталону измененного состояния подписанта. Предложен метод распознавания измененного состояния подписанта с использованием данной модели и многомерного функционала Байеса со средней вероятностью ошибок 0,105.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-07-09053).

### Литература

1. Утечки конфиденциальной информации в России и в мире. [http://www.zecurion.ru/upload/iblock/1e5/Zecurion\\_Data\\_Leaks\\_2016\\_full.pdf](http://www.zecurion.ru/upload/iblock/1e5/Zecurion_Data_Leaks_2016_full.pdf) (дата обращения: 26.07.2017).
2. Center for Strategic and International Studies, Net Losses: Estimating the Global Cost of Cybercrime, June 2014. [https://csis-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/legacy\\_files/files/attachments/140609\\_gp\\_economic\\_impact\\_cybercrime\\_report.pdf](https://csis-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/legacy_files/files/attachments/140609_gp_economic_impact_cybercrime_report.pdf) (дата обращения: 10.10.2017).
3. Епифанцев Б. Н., Ложников П. С., Сулавко А. Е., Жумажанова С. С. Идентификационный потенци-

ал рукописных паролей в процессе их воспроизведения // Автометрия. 2016. № 3. С. 28–36. doi:10.15372/AUT20160304

4. Сулавко А. Е., Еременко А. В., Толкачева Е. В., Борисов Р. В. Комплексирование независимых биометрических признаков при распознавании субъектов на основе сетей квадратичных форм, перцептронов и меры хи-модуль // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1. С. 50–62. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.50
5. Еременко А. В., Сулавко А. Е., Волков Д. А. Современное состояние и пути модернизации преобразователей биометрия-код // Информационные технологии. 2016. № 3. С. 203–210.

6. Ложников П. С., Сулавко А. Е., Смотуга А. Е. Модель защиты гибридных документов на основе рукописных подписей их владельцев с учетом психофизиологического состояния подписантов // Вопросы защиты информации. 2016. № 4. С. 47–59.
7. Еременко А. В., Ложников П. С., Сулавко А. Е. Генерация ключевых последовательностей на основе параметров подсознательных движений // Информационные системы и технологии. 2017. № 1. С. 99–109.
8. Ложников П. С., Сулавко А. Е., Еременко А. В., Волков Д. А. Экспериментальная оценка надежности верификации подписи сетями квадратичных форм, нечеткими экстракторами и перцептронами // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 73–85. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.73
9. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Samotuga A. E. Personal Identification and the Assessment of the Psychophysiological State While Writing a Signature // Information. 2015. N 6. P. 454–466. <http://www.mdpi.com/2078-2489/6/3/454> (дата обращения: 15.11.2013). doi:10.3390/info6030454
10. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Eremenko A. V., Volkov D. A. Methods of Generating Key Sequences based on Parameters of Handwritten Passwords and Signatures // Information. 2016. N 7(4). P. 59. [http://www.mdpi.com/2078-2489/7/4/59?utm\\_source=TrendMD&utm\\_medium=soc&utm\\_campaign=Information\\_TrendMD\\_0](http://www.mdpi.com/2078-2489/7/4/59?utm_source=TrendMD&utm_medium=soc&utm_campaign=Information_TrendMD_0) (дата обращения: 15.11.2013). doi:10.3390/info7040059
11. Сулавко А. Е., Еременко А. В., Левитская Е. А., Смотуга А. Е. Идентификация психофизиологических состояний подписантов по особенностям воспроизведения автографа // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 1. С. 40–48.
12. Богомолов А. В., Гридин Л. А., Кукушкин Ю. А., Ушаков И. Б. Диагностика состояния человека: математические подходы. — М.: Медицина, 2003. — 464 с.
13. Ильин Е. П. Психофизиология состояний человека. — СПб.: Питер, 2005. — 412 с.
14. Греченко Т. Н. Психофизиология. — М.: Гардарики, 1999. — 358 с.
15. Уэйнберг Р. С., Гоулд Д. Основы психологии спорта и физической культуры. — Киев: Олимпийская литература, 1998. — 336 с.
16. Прозоровский В. И., Карандаев И. С., Рубцов А. Ф. Вопросы организации экспертизы алкогольного опьянения // Судебно-медицинская экспертиза. 1967. № 1. С. 3–8.
17. De Waard D. The Measurement of Drivers' Mental Workload. — Haren: Traffic Safety Research Centre VSC; University of Groningen, 1996. — 135 p.
18. Mascord D. J., Heath R. A. Behavioral and Physiological Indices of Fatigue in a Visual Tracking Task // Journal of Safety Research. 1992. Vol. 23. P. 19–25.
19. Сулавко А. Е., Еременко А. В., Смотуга А. Е. Исключение искаженных биометрических данных из эталона субъекта в системах идентификации // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 3. С. 96–101.
20. Епифанцев Б. Н., Ложников П. С., Сулавко А. Е. Алгоритм идентификации гипотез в пространстве малоинформативных признаков на основе последовательного применения формулы Байеса // Межотраслевая информационная служба. 2013. № 2. С. 57–62.
21. Иванов А. И. Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции. — Пенза: ПНИЭИ, 2016. — 133 с.
22. Еременко А. В., Сулавко А. Е., Мишин Д. В., Федотов А. А. Идентификационный потенциал клавиатурного почерка с учетом параметров вибрации и силы нажатия на клавиши // Прикладная информатика. 2017. Т. 12. № 1 (67). С. 79–94.
23. Иванов А. И., Ложников П. С., Качайкин Е. И., Сулавко А. Е. Биометрическая идентификация рукописных образов с использованием корреляционного аналога правила Байеса // Вопросы защиты информации. 2015. № 3. С. 48–54.

UDC 004.93'1

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.29

### Impact of Psycho-Physiological State of Signers on Biometric Parameters of Manuscript Images and Results of their Verification

Sulavko A. E.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [sulavich@mail.ru](mailto:sulavich@mail.ru)Samotuga A. E.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, [samotugasashok@mail.ru](mailto:samotugasashok@mail.ru)<sup>a</sup>Omsk State Technical University, 11, Mira Pr., 644050, Omsk, Russian Federation

**Introduction:** An intruder can copy static biometric patterns to make a forgery as they are not secret. On the other hand, we can store dynamic handwritten patterns in secret, but they are dependent on psychophysiological state of their owner. **Purpose:** Evaluating the relationship between handwritten patterns and psycho-physiological state of the signers, and developing a method of handwritten pattern verification which would be resistant to changes in the signer's state. **Results:** We built a statistical model of changes in the parameters of handwritten patterns depending on the signer's state. Then we evaluated the informative value of the mentioned parameters for the problem of recognizing the signers and their states. Furthermore, we proposed a method of subject verification by

handwritten pattern with FRR and FAR respectively 0.0014 and 0.0045. To evaluate the impact of a signer's state on the verification results, we used the functional Hee-module, quadratic forms, Bayes hypothesis formula and its multidimensional analogue. We offered a method of recognizing an altered state of the signer using a handwritten pattern with an average error probability of 0.105 (without the need to create templates in the altered state). Finally, we suggested to use the Bayes – Hamming maximum likelihood networks which show the best results at recognizing signers in an altered state. **Practical relevance:** The proposed method of subject verification by handwritten pattern features can be practically used when creating a checkpoint function or remote authentication.

**Keywords** — Signature Parameters, Handwritten Password, Biometry, Wide Artificial Neural Networks, Quadratic Forms, Pattern Recognition Algorithms, Bayes Hypothesis Formula, Human Psycho-Physiological State Recognition.

## References

1. *Utechki konfidentsial'noi informatsii v Rossii i v mire* [Leaks of Confidential Information in Russia and in the World]. Available at: [http://www.zecurion.ru/upload/iblock/1e5/Zecurion\\_Data\\_Leaks\\_2016\\_full.pdf](http://www.zecurion.ru/upload/iblock/1e5/Zecurion_Data_Leaks_2016_full.pdf) (accessed 26 July 2017).
2. Center for Strategic and International Studies, Net Losses: Estimating the Global Cost of Cybercrime, 2014. Available at: [https://cis-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/legacy\\_files/files/attachments/140609\\_rp\\_economic\\_impact\\_cybercrime\\_report.pdf](https://cis-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/legacy_files/files/attachments/140609_rp_economic_impact_cybercrime_report.pdf) (accessed 10 October 2017).
3. Epifantsev B. N., Zhumazhanova S. S., Lozhnikov P. S., Sulavko A. E. Identification Potential of Online Handwritten Signature Verification. *Avtometriia*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 28–36 (In Russian). doi:10.15372/AUT20160304
4. Sulavko A. E., Eremenko A. V., Tolkacheva E. V., Borisov R. V. Complexation of Independent Biometric Features in People Recognition with Quadratic Forms, Perceptrons and Functional Hee-module. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 50–62 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.50
5. Eremenko A. V., Sulavko A. E., Volkov D. A. Current State and Ways to Modernize Converters Biometrics to Code. *Informatsionnye tekhnologii*, 2016, no. 3, pp. 203–210 (In Russian).
6. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Samotuga A. E. A Model of Protection of Hybrid documents on the basis of Handwritten Signatures with an Assessment of Psychophysiological State of Signers. *Voprosy zashchity informatsii*, 2016, no. 4, pp. 47–59 (In Russian).
7. Eremenko A. V., Lozhnikov P. S., Sulavko A. E. Generation of Key Sequences based on Subconscious Movements Parameters. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2017, no. 1, pp. 99–109 (In Russian).
8. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Eremenko A. V., Volkov D. A. Experimental Evaluation of Reliability of Signature Verification by Quadratic form Networks, Fuzzy Extractors and Perceptrons. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 5, pp. 73–85 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.73
9. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Samotuga A. E. Personal Identification and the Assessment of the Psychophysiological State While Writing a Signature. *Information*, 2015, no. 6(3), pp. 454–466. Available at: <http://www.mdpi.com/2078-2489/6/3/454> (accessed 15 November 2013). doi:10.3390/info6030454
10. Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Eremenko A. V., Volkov D. A. Methods of Generating Key Sequences based on Parameters of Handwritten Passwords and Signatures. *Information*, 2016, no. 7(4), p. 59. Available at: [http://www.mdpi.com/2078-2489/7/4/59?utm\\_source=TrendMD&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=Information\\_TrendMD\\_0](http://www.mdpi.com/2078-2489/7/4/59?utm_source=TrendMD&utm_medium=cpc&utm_campaign=Information_TrendMD_0) (accessed 15 November 2013). doi:10.3390/info7040059
11. Sulavko A. E., Eremenko A. V., Levitskaya H. A., Samotuga A. E. Identification of Psychophysiological States of Signers by Autograph Reproduction Features. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*, 2017, no. 3, pp. 40–48 (In Russian).
12. Bogomolov A. V., Gridin L. A., Kukushkin Iu. A., Ushakov I. B. *Diagnostika sostoianiia cheloveka: matematicheskie podkhody* [Diagnosis of a Person's State: Mathematical Approaches]. Moscow, Meditsina Publ., 2003. 464 p. (In Russian).
13. Il'in E. P. *Psikhofiziologiya sostoianii cheloveka* [Psychophysiology of Human States]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2005. 412 p. (In Russian).
14. Grechenko T. N. *Psikhofiziologiya* [Psychophysiology]. Moscow, Gardariki Publ., 1999. 358 p. (In Russian).
15. Ueinberg R. S., Gould D. *Osnovy psikhologii sporta i fizicheskoi kul'tury* [Fundamentals of Psychology of Sport and Physical Education]. Kiev, Olimpiiskaia literatura Publ., 1998. 336 p. (In Russian).
16. Prozorovskii V. I., Karandaev I. S., Rubtsov A. F. Questions of the Organization Examination of Intoxication. *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza* [Forensic Medical Expertise], 1967, no. 1, pp. 3–8 (In Russian).
17. De Waard D. *The Measurement of Drivers' Mental Workload*. Haren, Traffic Safety Research Centre VSC, University of Groningen, 1996. 135 p.
18. Mascord D. J. & Heath R. A. Behavioral and Physiological Indices of Fatigue in a Visual Tracking Task. *Journal of Safety Research*, 1992, vol. 23, pp. 19–25.
19. Sulavko A. E., Eremenko A. V., Samotuga A. E. Exceptions Gross Mistakes of Biometric Data before Creating Measurement Standards of People in Biometric Identification Systems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*, 2013, no. 3, pp. 96–101 (In Russian).
20. Epifantsev B. N., Lozhnikov P. S., Sulavko A. E. An Algorithm of Hypotheses Identification in an Uninformative Attribute Space based on Consistent. *Mezhotraslevaia informatsionnaia sluzhba*, 2013, no. 2, pp. 57–62 (In Russian).
21. Ivanov A. I. *Mnogomernaia neirosetevaia obrabotka biometricheskikh dannykh s programmnyim vosproizvedeniem effektivov kvantovoi superpozitsii* [Multidimensional Neural Network Processing of Biometric Data with Software Reproduction of Quantum Superposition Effects]. Penza, PNIEI Publ., 2016. 133 p. (In Russian).
22. Eremenko A. V., Sulavko A. E., Mishin D. V., Fedotov A. A. Identification Potential of Keyboard Handwriting Considering Vibration Parameters and Force Keystrokes. *Prikladnaia informatika*, 2017, vol. 12, no. 1(67), pp. 79–94 (In Russian).
23. Ivanov A. I., Kachajkin E. I., Lozhnikov P. S., Sulavko A. E. Biometric Identification of Handwritten Images via Correlation Analog of Bayes Rule. *Voprosy zashchity informatsii*, 2015, no. 3, pp. 48–54 (In Russian).

## МЕТОД ОБРАБОТКИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ ЗОН ПРОИЗРАСТАНИЯ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО

Д. М. Рыжиков<sup>а, 1</sup>, инженер 1-й категории

<sup>а</sup>«КосмоИнформ-Центр» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** в настоящее время важной задачей в ряде регионов Российской Федерации является выявление мест произрастания растений признанного сорным вида борщевик Сосновского, который не только вытесняет другие виды, занимая все новые площади, но и представляет опасность для животных и человека, так как вызывает ожоги и ряд болезней. Задача контроля зон произрастания борщевика Сосновского может эффективно решаться с применением данных дистанционного зондирования Земли. **Цель исследования:** разработка технологии контроля зон произрастания борщевика Сосновского на основе предложенного метода обработки мультиспектральных спутниковых данных. **Результаты:** разработан и реализован в виде программного комплекса в среде ERDAS Imagine Professional метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для контроля зон произрастания борщевика Сосновского. Решение задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского по мультиспектральным спутниковым данным включает в себя ряд процедур: получение спутниковой информации; обнаружение зон произрастания борщевика Сосновского по спутниковым данным; отслеживание и анализ изменений зон произрастания борщевика Сосновского при помощи архивных данных; валидацию разработанного метода обработки мультиспектральных спутниковых данных для различных космических аппаратов. Валидация разработанного метода проводилась по показателю площади борщевика Сосновского в пределах исследуемых участков местности по результатам сравнения с материалами полевых экспедиций и верифицированными результатами обработки данных космического аппарата RapidEye. Публикация результатов обработки в тематическом геопортале обуславливает возможность удаленного доступа к результатам контроля зон произрастания борщевика Сосновского по сети Интернет. **Практическая значимость:** разработанная технология контроля зон произрастания борщевика Сосновского по мультиспектральным спутниковым данным позволяет определять координаты и площади этих зон, что является опорной информацией для оперативного мониторинга природных сред.

**Ключевые слова** — контроль природной среды, борщевик Сосновского, дистанционное зондирование Земли.

### Введение

Контроль зон произрастания различных видов растений сельскохозяйственного назначения может эффективно проводиться с применением данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1–3]. Данные спутниковой съемки являются объективными, охватывают значительные площади, имеют низкую стоимость. В настоящее время важной задачей в ряде регионов Российской Федерации является выявление мест произрастания борщевика Сосновского (БС) в целях возможного его использования как ценного производственного сырья либо уничтожения в местах бесконтрольного распространения [4]. Выявление зон дает основание для составления прогноза распространения по конкретным территориям, а также оценки урожайности БС.

Вид растений борщевик Сосновского (лат. *Heracleum Sosnowskyi*), во второй половине XX в. выращиваемый в СССР в качестве кормовой

культуры, в настоящее время включен в реестр сорных растений. В последние годы угроза распространения БС на территории Российской Федерации стоит крайне остро [5, 6]. Растения данного вида постепенно вытесняют растения других видов, занимая все новые площади. Помимо этого, БС представляет опасность для животных и человека, так как вызывает ожоги и ряд болезней [7]. Однако в настоящее время существуют предложения по использованию БС в качестве сырья для производства спиртов и древесного угля. При этом возникает необходимость разработки метода обработки мультиспектральных спутниковых данных в целях получения достоверной информации о зонах и динамике распространения БС. Применяемый в настоящее время метод контроля БС путем проведения полевых исследований имеет ряд недостатков, таких как опасность для человека, высокая стоимость, малая исследуемая площадь, субъективный фактор анализа данных.

Решение задачи контроля зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным включает в себя несколько процедур: получение спутниковой информации; обнаружение зон произрастания БС по спутниковым данным;

<sup>1</sup> Научный руководитель — кандидат географических наук, заместитель директора ЦКУ «КосмоИнформ-Центр» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения Е. Ф. Чичкова.

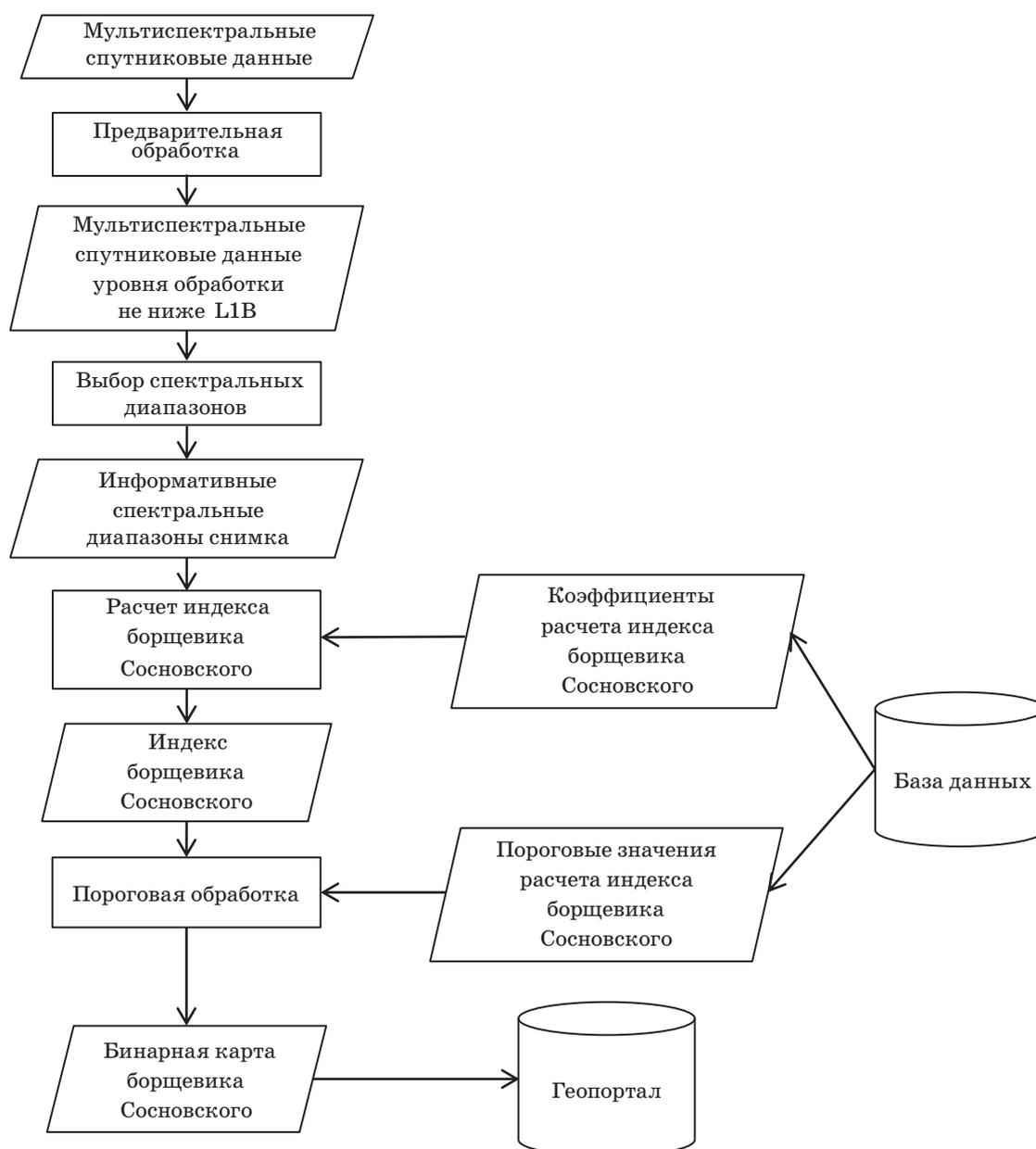
отслеживание и анализ изменений зон произрастания БС при помощи архивных данных; валидацию разработанного метода обработки мультиспектральных спутниковых данных для различных космических аппаратов (КА).

**Структурная схема обработки мультиспектральных спутниковых данных для контроля зон произрастания борщевика Сосновского**

В основе контроля зон произрастания БС лежит структурная схема обработки спутниковой информации (рис. 1).

Структурная схема реализована в виде программного комплекса обработки спутниковой информации в среде ERDAS Imagine Professional. Обработка спутниковых снимков производится с использованием попиксельного подхода.

В настоящее время в качестве исходной спутниковой информации для тематической обработки программным комплексом используются данные КА LandSat-8, Sentinel-2A (2B) и RapidEye уровня обработки L0 или L1B. В частности, для приведения исходных данных КА LandSat-8 к уровню обработки L1B необходимо проводить процедуру радиометрической калибровки, являющуюся стандартной операцией.



■ **Рис. 1.** Структурная схема обработки спутниковой информации для контроля зон произрастания БС  
 ■ **Fig. 1.** Structural scheme of the satellite information processing for the area of Heracleum Sosnowskyi growth control

### Выбор исходной спутниковой информации

Широкое разнообразие функционирующих на земной орбите КА ДЗЗ определяет необходимость выбора исходной спутниковой информации для решения поставленной задачи контроля. Как показали наземные наблюдения в Ленинградской области (ЛО), БС может расти как группами по 3–5 растений, так и единолично занимать до 100 % площади отдельных полей. Площадь отдельных ареалов может достигать значения нескольких гектаров. Исходя из пространственного разрешения (ПР) данных, регулярности съемки территорий, охватываемой площади и доступности данных производился выбор КА ДЗЗ для решения данной задачи. Установлено, что для контроля зон произрастания БС подходят данные с КА высокого и среднего ПР, например КА SPOT-7, «Ресурс-П/МБА», «Ресурс-П/ШМСА-ВР», «Канопус-В», LandSat-8, Sentinel-2A и RapidEye.

Для разработки метода обработки мультиспектральных спутниковых данных были выбраны данные с КА LandSat-8 (ПР — 30 м), Sentinel-2A (ПР — 10 м) и RapidEye (ПР — 6,5 м). Площади на поверхности Земли, охватываемые одним пикселем рассмотренных КА, следующие:

$$S_{LandSat-8} = 30 \times 30 \text{ м} = 900 \text{ м}^2 = 0,09 \text{ га};$$

$$S_{Sentinel-2A} = 10 \times 10 \text{ м} = 100 \text{ м}^2 = 0,01 \text{ га};$$

$$S_{RapidEye} = 6,5 \times 6,5 \text{ м} = 42,25 \text{ м}^2 \approx 0,004 \text{ га}.$$

При этом данные LandSat-8, Sentinel-2A — свободно распространяемые, периодичность съемки составляет 16 и 10 сут соответственно. RapidEye представляет собой группировку из пяти спутников с идентичными характеристиками, что обеспечивает периодичность съемки, равную 1 сут.

Спутниковые данные сверхвысокого ПР (лучше 2 м), например WorldView-2,3, QuickBird, GeoEye, неэффективны при решении задачи контроля ввиду недостаточного процента покрытия исследуемой территории за один сезон и высокой стоимости.

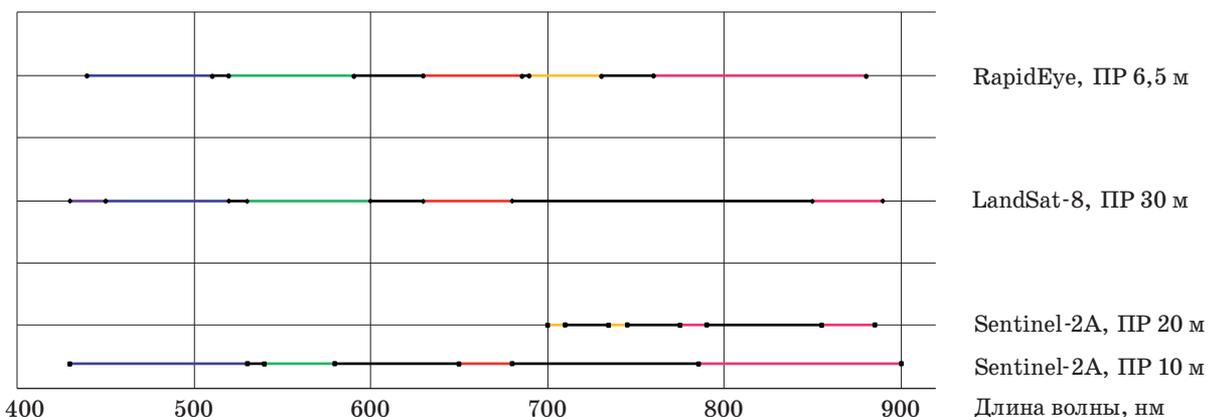
Спутниковые данные низкого ПР (250 м–1 км), например Terra/MODIS, Aqua/MODIS, Suomi/NPP, не использовались из-за недостаточного ПР. Площади пикселей изображений данных КА для большинства каналов съемки превышают 10 га.

При этом важным условием исследования является разработка универсального метода для решения задачи контроля БС по мультиспектральным спутниковым данным, что определяет использование в качестве информативных спектральных диапазонов тех из них, которые наиболее распространены среди современных систем ДЗЗ. Диаграмма спектральных диапазонов рассматриваемых КА в области видимого и ближнего инфракрасного излучения представлена на рис. 2.

Для всех рассмотренных систем общими являются синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный съемочные диапазоны. Следует заметить, что каналы не полностью совпадают по диапазонам длин волн, так, например, ширина инфракрасного диапазона LandSat-8 составляет 40 нм, RapidEye — 120 нм, Sentinel-2A — 114 нм. Так как съемочный канал в фиолетовом диапазоне присутствует лишь у LandSat-8, его данные не использовались при разработке метода.

### Информативные признаки зон произрастания борщевика Сосновского

Обнаружение зон произрастания БС по спутниковым данным производится на основе информативных признаков данного вида растений. В общем случае задача обнаружения объектов



■ Рис. 2. Спектральные диапазоны рассматриваемых КА ДЗЗ

■ Fig. 2. The spectral ranges of the Earth remote sensing satellites under consideration

подстилающей поверхности по мультиспектральным спутниковым снимкам заключается в распознавании этих объектов на фоне других объектов по определенным показателям. Необходимым условием обнаружения объектов подстилающей поверхности по спутниковым снимкам является наличие информативных признаков, характеризующих их отличительные особенности. Информативные признаки для решения задач обнаружения выбираются следующим образом: они должны с формальной точки зрения описывать объекты в виде определенного условия или критерия. Помимо этого, информативные признаки максимизируют различия между объектами интереса и другими объектами, а также минимизируют различия между объектами интереса [8–11].

При разработке метода обнаружения зон произрастания БС использовались мультиспектральные спутниковые данные КА RapidEye. На рис. 3, а и б приведены фрагменты снимков территории ЛО, на которых обнаружен БС.

Снимки представлены в естественных цветах (RGB — 3, 2, 1 — комбинация красного, зеленого и синего съемочных каналов). Целевой объект на изображениях выделяется ярким зеленым цветом. Спектральные яркости пикселей, соответствующих БС, отличаются от фоновых значений пикселей окружающей растительности и антропогенных объектов в рассмотренных спектральных диапазонах. По данным КА RapidEye для территории ЛО, полученных в 2011–2014 гг. (10 снимков), рассчитаны статистические харак-

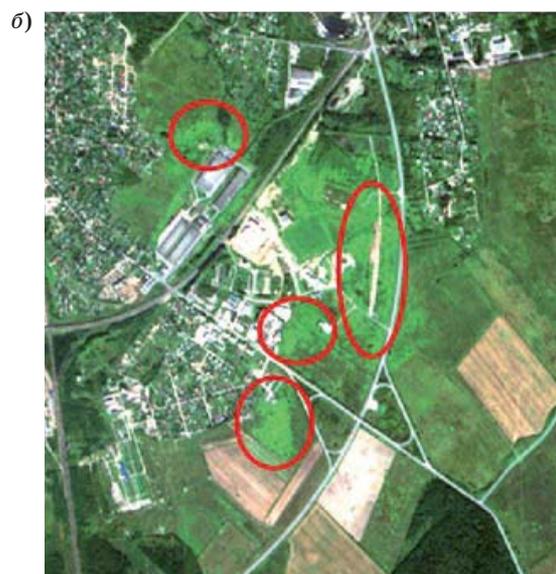
теристики спектральных яркостей пикселей (математическое ожидание, дисперсия) для следующих типов поверхности: сельскохозяйственных полей; смешанных лесов; обнаженного грунта/почвы; болотистой растительности; урбанизированных зон; водных объектов; БС.

Для сельскохозяйственных полей выбрано по два тестовых участка на каждый снимок, соответствующих различным возделываемым сельскохозяйственным культурам или стадиям сельскохозяйственных работ. Для БС выбрано по три тестовых участка на каждый снимок, соответствующих различным фенологическим фазам БС. Для остальных типов поверхности выбрано по одному тестовому участку на снимок. Размер тестовых участков варьировался от 0,2 до 40 га.

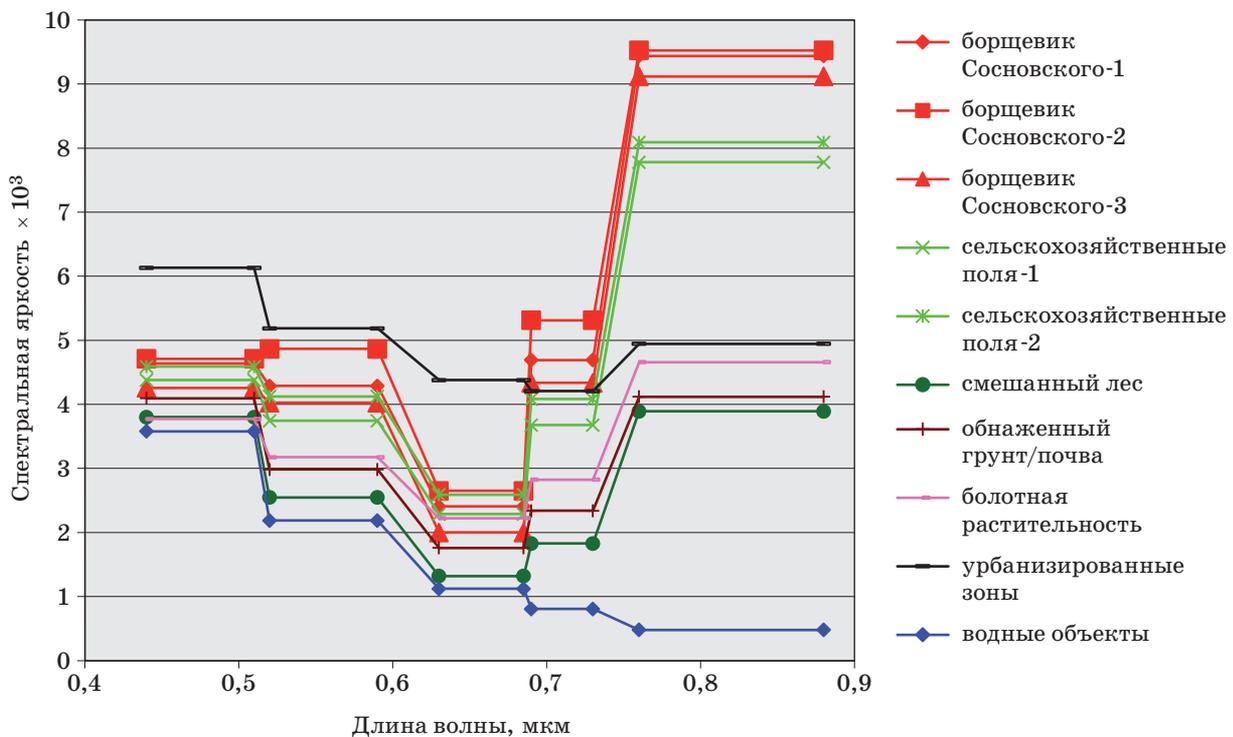
Зависимости средних значений спектральной яркости тестовых участков типов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye, проведенной 27.07.2013, представлены на рис. 4.

Исходя из отличий свойств отражения БС и других типов подстилающей поверхности, для решения задачи разработки метода обнаружения зон произрастания БС по мультиспектральным спутниковым данным выбраны следующие яркостные информативные признаки:

— БС имеет наиболее близкие значения (разница не более 250 ед.) в синем и зеленом спектральных диапазонах съемки, что объясняется более высокими значениями в зеленом диапазоне относительно синего по сравнению с другими рассмотренными классами объектов;



■ **Рис. 3.** Фрагменты снимков RapidEye, на которых присутствует БС (выделен красным): а — 27.07.2013, RGB — 3, 2, 1; б — 07.09.2013, RGB — 3, 2, 1  
 ■ **Fig. 3.** Fragments of RapidEye images where the Heracleum Sosnowskyi is present (highlighted in red): а — 27/07/2013, RGB — 3, 2, 1; б — 07/09/2013, RGB — 3, 2, 1



■ **Рис. 4.** Зависимости средних значений спектральной яркости тестовых участков типов подстилающей поверхности от диапазонов длин волн каналов съемки КА RapidEye  
 ■ **Fig. 4.** Dependencies of the average spectral brightness of the underlying surface types test sections from the wavelength ranges of the survey channels of the RapidEye satellite

— БС имеет наибольшие значения в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне съемки (в некоторых случаях наряду с сельскохозяйственными полями);

— красный и крайний красный спектральные диапазоны съемки являются наименее информативными для обнаружения зон произрастания БС.

### Тематическая обработка мультиспектральных спутниковых данных

Тематическая обработка мультиспектральных спутниковых данных состоит из двух этапов: попиксельного расчета индекса БС и пороговой обработки полученных данных (см. рис. 1).

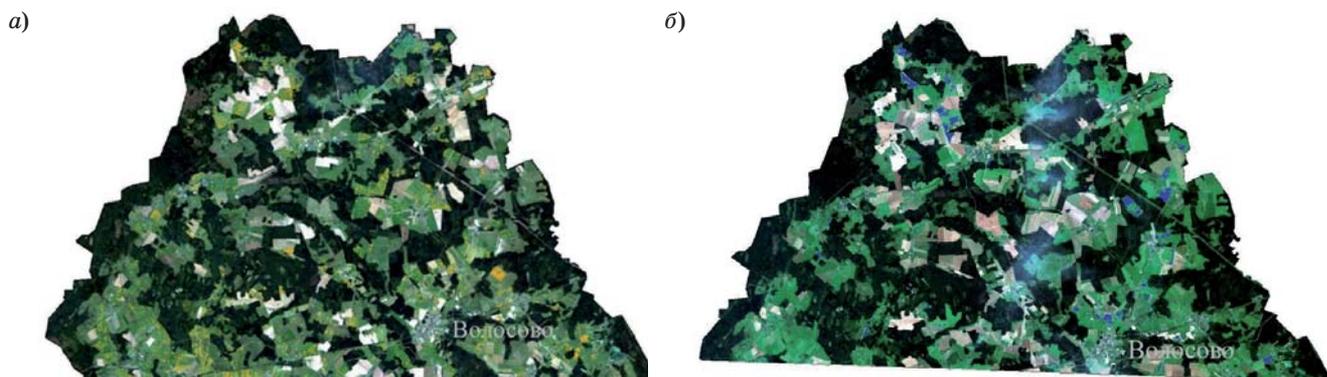
Расчет индекса БС базируется на методах спектральных преобразований и отношений, широко распространенных в ДЗЗ. Данные методы снижают влияние различий естественной освещенности и атмосферных искажений и являются наименее требовательными к выполнению предварительной обработки мультиспектральных спутниковых данных. Наиболее известна в настоящее время группа спектральных преобразований — индексы вегетации — показатели, отражающие состояние растительного покрова [12]. В результате проведенных исследований

установлено, что существующие индексы вегетации не применимы в качестве информативных признаков БС. Для решения задачи обнаружения зон произрастания БС разработано новое спектральное отношение [13], названное Heracleum Sosnowskyi Index (HSI). В настоящее время получен приоритет на изобретение для способа на основе HSI.

Разработанный индекс подразумевает использование коэффициентов для различных КА, которые хранятся в базе данных. Следует заметить, что природные объекты подвержены изменениям характеристик отражения в течение года [14]. Исходя из этого коэффициенты для расчета индекса БС подобраны эмпирическим путем с учетом смены фенологических фаз БС.

Расчитанный слой индекса HSI подвергается процедуре пороговой обработки. Пороговые значения выбирались на основе результатов обработки тестовых полигонов рассмотренных снимков. Пиксели, для которых значение индекса HSI превышает порог, маркировались как БС. В результате создавался бинарный растровый слой.

Как правило, на мультиспектральном спутниковом снимке имеются дефекты, «битые» пиксели, облачность, тени от облачности, которые могут привести к заведомо ложному результату. Поэтому требуется применение дополнительных



■ **Рис. 5.** Результат обнаружения зон произрастания БС, Волосовский район, ЛО: *а* — БС выделен оранжевым цветом, КА RapidEye, 07.09.2013; *б* — БС выделен синим цветом, КА Sentinel-2A, 22.08.2016

■ **Fig. 5.** The result of detection of the area of Heracleum Sosnowskyi growth, Volosovsky district, Leningrad Region: *a* — Heracleum Sosnowskyi — orange color, RapidEye, 07/09/2013; *б* — Heracleum Sosnowskyi — blue color, Sentinel-2A, 22/08/2016

критериев в виде пороговых значений, которые позволят устранить влияние этих эффектов [15].

В итоге процесса обработки спутниковых данных создается бинарный слой результатов обнаружения зон произрастания БС, который размещается в тематическом геопортальном проекте (рис. 5, *а* и *б*).

Представленная система обработки позволяет осуществлять контроль зон произрастания БС через анализ регулярно обновляющихся разновременных данных о зонах распространения БС, полученных на основе обработки спутниковой информации различных КА ДЗЗ. На следующих этапах контроля производится обнаружение изменений и определение динамики распространения БС (см. рис. 5). Все полученные результаты размещаются в геопортале в виде геопространственных слоев информации, что позволяет производить заключительный этап контроля, а именно анализ динамики зон произрастания БС.

#### **Валидация метода обнаружения зон произрастания борщевика Сосновского по мультиспектральным спутниковым данным**

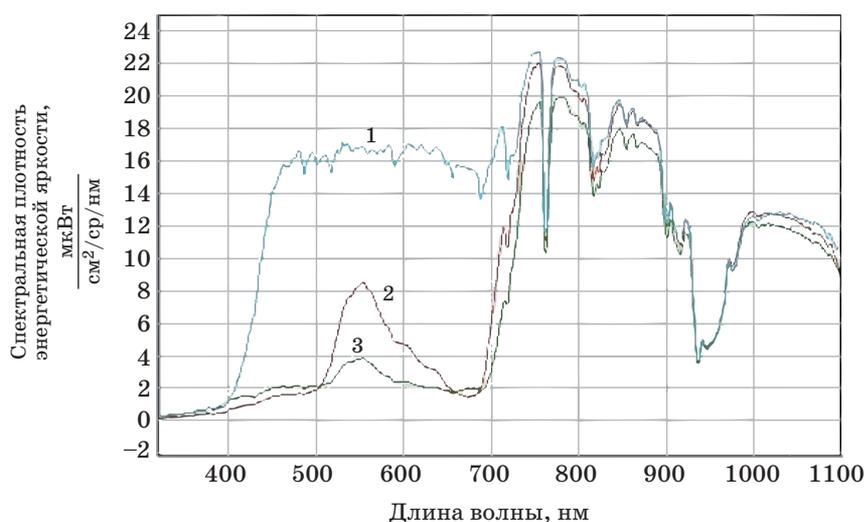
Валидация метода обнаружения зон произрастания БС проводилась на основе анализа результатов обработки мультиспектральных спутниковых данных КА RapidEye и материалов полевых исследований. Для проверки результатов обнаружения БС по спутниковым данным проведена серия полевых маршрутов в летний период 2016 г. При помощи полевого портативного спектрометра PSR-1100 произведены измерения для соцветий и листьев БС в отдельности (см. рис. 5, *б*), измеряемая величина — спектральная плотность

энергетической яркости. Сравнение графиков, полученных по данным спутниковой съемки КА RapidEye (см. рис. 4) и по измерениям спектрорадиометра (рис. 6), показывает, что основные яркостные информативные признаки обнаружения БС по спутниковым данным подтверждаются результатами полевых измерений.

На следующем этапе проводилась валидация разработанного метода по показателю площади БС в пределах исследуемого участка местности. Результаты расчета площадей по разработанному методу обнаружения БС сравнивались с материалами полевых экспедиций. В качестве исследуемых участков выбраны территории вблизи поселков Разметелево (Всеволожский район, ЛО), Мельниково (Приозерский район, ЛО), Янино (Всеволожский район, ЛО), Федоровское (Тосненский район, ЛО), для которых были проведены маршрутные исследования в 2014–2016 гг.

По результатам обработки спутниковых данных и материалов полевых экспедиций среднеквадратическое отклонение площади исследуемых участков составило 7 %. Полученный результат обусловлен недостаточным ПР для обнаружения каждого растения БС и признан удовлетворительным. Для проведения валидации метода обнаружения зон произрастания БС планируется использование результатов дешифрирования аэрофотосъемки. Для этих целей достаточно и экономически оправдано проведение аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата.

Валидация разработанного метода обнаружения для КА LandSat-8 и Sentinel-2A проведена по верифицированным результатам обработки данных КА RapidEye. Необходимость проведения валидации разработанного метода возникает также в случае использования данных новых космиче-



■ **Рис. 6.** Зависимости спектральной плотности энергетической яркости от длины волны, полевые измерения 12.07.2016: 1 — соцветие БС, стадия цветения; 2 — лист БС; 3 — травянистая растительность

■ **Fig. 6.** Dependence of brightness spectral density from wavelength, field measurements 12/07/2016: 1 — inflorescence of *Heracleum Sosnowskyi*, flowering stage; 2 — sheet *Heracleum Sosnowskyi*; 3 — grassy vegetation

ских аппаратов, отличающихся по орбитальным, спектральным и пространственным параметрам съемки.

### Заключение

Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задачи контроля зон произрастания БС разработан на основе данных КА RapidEye и использовался при выполнении государственного контракта № 22 от 19.08.2015 г. (заказчик — Комитет по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области). Метод адаптирован к данным КА LandSat-8 и Sentinel-2A. В соответствии с разработанными требованиями к ПР и составу спектральных диапазонов снимков, используемых в качестве исходных данных, метод и технология могут быть адаптированы для КА SPOT-6,7, LandSat-7 (архивные данные), «Ресурс-П/МВА», «Ресурс-П/ШМСА-ВР», «Канопус-В» и др.

Разработанная технология контроля позволяет определять координаты и площади зон произрас-

тания БС, что может служить опорной информацией для оперативного мониторинга природных сред, осуществляемого в настоящее время территориальными управлениями по сельскому хозяйству, а также рядом академических и отраслевых организаций и институтов, выполняющих исследования в области экологии, природопользования и сельского хозяйства. Данный метод применим для оценки общей урожайности БС в пределах отдельных регионов Российской Федерации.

Использование в качестве исходной информации спутниковых снимков ряда КА обеспечивает возможность оперативного получения и обновления результатов контроля. Публикация результатов обработки в тематическом геопортале обуславливает возможность удаленного доступа к результатам контроля БС по сети Интернет для принятия управленческих решений в сфере сельского хозяйства и природопользования.

Разработанный метод может быть использован для контроля различных растительных компонентов ландшафта, а также для составления фитоэкологических, флористических и прогнозных карт в задачах биогеографии и экологии.

### Литература

1. Ткачева А. А., Фаворская М. Н. Моделирование трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 40–49. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.40
2. Зинченко В. Е., Лохманова О. И., Калиниченко В. П., Глухов А. И., Повх В. И., Шляхова Л. А. Космиче-

ский мониторинг земель сельскохозяйственного назначения юга России // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 33–44.

3. Кобелева Н. В., Чичкова Е. Ф. Использование аэрокосмических данных для выявления и картографирования структурно-динамических особенностей спонтанных и антропогенных фитоэкосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Тез. докл. 14-й Всерос. от-

- крытой конф., Москва, 14–29 ноября 2016 г. С. 33. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28175366> (дата обращения: 15.10.2017).
4. Жиглова О. В. Использование геоинформационных технологий при выявлении очагов борщевика Сосновского // Защита и карантин растений. 2012. № 5. С. 8–9.
  5. Симонов Г. А., Никульников В. А., Затеев В. С. Борщевик Сосновского — злостный засоритель полей // Ученые зап. Орловского государственного университета. Сер. Естественные, технические и медицинские науки. 2011. № 3. С. 324–326.
  6. Иванов М. Ф. Борьба с борщевиком Сосновского в Новгородской области // Защита и карантин растений. 2012. № 10. С. 26–27.
  7. Лунева Н. Н. Борщевик Сосновского в Российской Федерации // Защита и карантин растений. 2014. № 3. С. 12–18.
  8. Хименко В. И., Охтилев М. Ю., Ключарев А. А., Матяш В. А. Анализ информативных признаков в задачах обработки данных аэрокосмического мониторинга // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2. С. 2–12. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.2
  9. Рыжиков Д. М. Автоматизация дешифрирования космических снимков по эталонному спектральному образу лиственного леса // Научная сессия ГУАП. Ч. II. Технические науки: сб. докл. СПб., 2015. С. 292–297.
  10. Кондратьев К. Я., Федченко Н. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 216 с.
  11. Лебедев В. В., Гансвинд И. Н. Проектирование систем космического мониторинга. — М.: Наука, 2010. — 388 с.
  12. Черепанов А. С. Вегетационные индексы // Геомастика. 2011. № 2. С. 98–102.
  13. Рыжиков Д. М., Тимофеев А. С. Технология мониторинга борщевика Сосновского с онлайн геопортальной поддержкой [Электронный ресурс] // Дистанционное зондирование Земли — сегодня и завтра: материалы 2-й Междунар. конф. 2014. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
  14. Григорьев А. Н. Методика формирования спектральных характеристик объектов на основе мультимедийных данных космической гиперспектральной съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 175–184.
  15. Чичкова Е. Ф., Кондратьев С. А., Рыжиков Д. М., Тимофеев А. С., Шмакова М. В. Идентификация типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки Landsat с целью оценки биогенной нагрузки на Финский залив // Ученые зап. Российского государственного гидрометеорологического ун-та. 2016. № 43. С. 246–254.

UDC 528.8, 58.084

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.43

### Heracleum Sosnowskyi Growth Area Control by Multispectral Satellite Data

Ryzhikov D. M.<sup>a</sup>, First Category Engineer, ryzhikov89@yandex.ru

<sup>a</sup>CSS «KosmoInform-Center» Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** An important problem in some regions of Russian Federation is identifying the areas where *Heracleum Sosnowskyi* grows, an invasive weed dangerous for animals and humans, causing burns and certain diseases. The areas of *Heracleum Sosnowskyi* growth can be effectively monitored using Earth remote sensing data. **Purpose:** On the basis of the proposed method for multispectral satellite data processing, a technology should be developed for *Heracleum Sosnowskyi* growth area control. **Results:** A method for *Heracleum Sosnowskyi* growth area control has been developed and implemented as a software package in ERDAS Imagine Professional environment. The solution of the problem includes a number of procedures: obtaining the satellite data; detecting *Heracleum Sosnowskyi* growth areas from these data; monitoring and analysis of changes in these areas with the help of archival data; validation of the developed method of multispectral satellite data processing for various satellites. The indicator for the method validation was the area covered by *Heracleum Sosnowskyi* within the surveyed zones. Field expedition materials were compared with the verified results of RapidEye satellite data processing. The results of the processing are published in a thematic geoportal project, providing the possibility of remote access to them over the Internet. **Practical relevance:** The developed control technology allows you to determine the coordinates and areas of *Heracleum Sosnowskyi* growth zones, which can serve as reference information for the operational monitoring of natural environments.

**Keywords** — Environmental Control, *Heracleum Sosnowskyi*, Earth Remote Sensing.

### References

1. Tkacheva A. A., Favorskaya M. N. Modeling of 3D Forest Scenes by Laser Scanning and Air Photo Data. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 40–49 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.40
2. Zinchenko V. E., Lokhmanova O. I., Kalinitchenko V. P., Glukhov A. I., Povkh V. I., Shljakhova L. A. Land Monitoring from Space of Agricultural Fields in the Southern Part of Russia. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, no. 3, pp. 33–44 (In Russian).
3. Kobeleva N. V., Chichkova E. F. The Use of Aerospace Data to Identify and Mapping the Structural and Dynamic Features of Spontaneous and Anthropogenic Phytoecosystems. *Sbornik tezisov dokladov Chetyrnadcatoj Vserossijskoj otkrytoj konferencii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa"* [Abstracts of the Four-

- teenth All-Russian Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space", Moscow, November 14–29, 2016, pp. 33 (In Russian). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28175366> (accessed 15 October 2017).
4. Zhiglova O. V. The use of Geoinformation Technologies in the Detection of Heracleum Sosnowskyi Outbreaks. *Zashchita i karantin rastenii*, 2012, no. 5, pp. 8–9 (In Russian).
  5. Simonov G. A., Nikulnikov V. A., Zateev V. S. Heracleum Sosnowskyi — Malicious Weed of Fields. *Uchenye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye, tekhnicheskie i meditsinskie nauki*, 2011, no. 3, pp. 324–326 (In Russian).
  6. Ivanov M. F. Struggle against the Heracleum Sosnowskyi in the Novgorod region. *Zashchita i karantin rastenii*, 2012, no. 10, p. 26–27 (In Russian).
  7. Luneva N. N. Heracleum Sosnowskyi in Russian Federation. *Zashchita i karantin rastenii*, 2014, no. 3, pp. 12–18 (In Russian).
  8. Khimenko V. I., Okhtilev M. Yu., Klucharev A. A., Matiash V. A. Informative Feature Analysis in Data Processing for Aerospace Monitoring. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2017, no. 2, pp. 2–12 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.2
  9. Ryzhikov D. M. Automation of the Space Images Interpretation by Deciduous Forest Spectral Signature. *Nauchnaia sessia GUAP. Chast' II. Tekhnicheskie nauki*, 2015, pp. 292–297 (In Russian).
  10. Kondratyev K. Y., Fedchenko Y. P. *Spektral'naiia otrazhatel'naiia sposobnost' i raspoznavanie rastitel'nosti* [Spectral Reflectance and Vegetation Recognition]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982. 216 p. (In Russian).
  11. Lebedev V. V., Gansvind I. N. *Proektirovanie sistem kosmicheskogo monitoringa* [Remote Sensing Systems Design]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 388 p. (In Russian).
  12. Cherepanov A. S. Vegetation indexes. *Geomatika*, 2011, no. 2, pp. 98–102 (In Russian).
  13. Ryzhikov D. M., Timofeev A. S. Technology of Heracleum Sosnowskyi Monitoring with Online Geoportail Support. *Materialy vtoroj Mezhdunarodnoi konferentsii "Distantionnoe zondirovanie Zemli — segodnia i zavtra"* [Proc. of the 2nd Intern. Conf. "Earth Remote Sensing — Today and Tomorrow"], 2014 (In Russian). — 1 electron. opt. disk (CD-ROM).
  14. Grigoriev A. N. The Method of Formation of Objects Spectral Characteristics on the basis of Multitemporal Data of Space Hyperspectral Remote Sensing. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 175–184 (In Russian).
  15. Chichkova E. F., Kondratyev S. A., Ryzhikov D. M., Timofeev A. S., Shmakova M. V. Identification of the Land Surface types on LandSat Data to Assess the Nutrient Load of the Gulf of Finland. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2016, no. 43, pp. 246–254 (In Russian).

**Научный журнал  
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»  
выходит каждые два месяца.**

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 6000 рублей, для подписчиков стран СНГ — 6600 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 15385 — полугодовой индекс,  
а также через посредство подписных агентств:  
«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»  
Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,  
эл. почта: [press@crp.spb.ru](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto:zajavka@crp.spb.ru),  
сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)  
Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,  
эл. почта: [export@periodicals.ru](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»  
Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto:podpiska@delpress.ru),  
сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»  
Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: [kazan@komcur.ru](mailto:kazan@komcur.ru),  
сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)  
Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)  
Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)  
Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>; РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2016 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>), НЭБ (<http://www.elibrary.ru>) и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy>).

# МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОРСКОГО СУДНА

П. И. Смирнов<sup>а</sup>, канд. техн. наук

Т. М. Татарникова<sup>б</sup>, доктор техн. наук, доцент

Н. В. Яготинцева<sup>в</sup>, старший преподаватель

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

<sup>в</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** проектирование геоинформационной системы управления морским судном является сложным пошаговым процессом, отличающимся комбинированным применением этапов автоматической генерации вариантов архитектуры геоинформационной системы и экспертных решений. **Цель исследования:** разработка методического обеспечения формирования облика геоинформационной системы путем последовательного приближения ее архитектуры к заданному набору свойств. **Результаты:** предложена структурно-функциональная модель геоинформационной системы управления морским судном, количественное и качественное описание которой позволяет выполнить структурную оптимизацию геоинформационной системы под цели плавания. Разработана методика формирования облика геоинформационной системы управления морским судном, которая включает последовательность действий для приближения архитектуры геоинформационной системы к заданному набору свойств. Разработана экспертная система по выбору облика геоинформационной системы морского судна в рамках верификации предложенной методики проектирования, которая позволяет в диалоговом режиме формировать списочный состав необходимого оборудования и функциональных модулей геоинформационной системы. **Практическая значимость:** экспертная система может быть полезна при проектировании интегрированных систем управления морским динамическим объектом.

**Ключевые слова** — геоинформационная система динамического объекта, структурно-функциональная модель, количественные и качественные характеристики, методика формирования облика геоинформационной системы, экспертная система формирования облика геоинформационной системы.

## Введение

Применение геоинформационных систем (ГИС) в управлении динамическими объектами является сложной комплексной задачей, требующей привлечения специальных математических моделей, методик и программно-аппаратных средств реализации ГИС. Особенно эта задача становится актуальной применительно к управлению морскими судами, поскольку возникает необходимость в реальном масштабе времени получать информацию о местоположении, окружающей обстановке, метеорологических условиях, рассчитывать загрузку пути, время прибытия и на основе этих данных принимать решения о прокладке и корректировке маршрута [1–3].

Анализ публикаций и нормативных документов последних 5–7 лет в вопросах технической реализации задач управления морскими судами показал, что это направление развивается в сторону интеграции существующих комплексов [4], станций, систем и функциональных элементов в единую ГИС морского судна, построенную на технологии локальной сети с коммутацией сегментов [5].

С другой стороны, реализация ГИС поддержки принятия решения при управлении морским

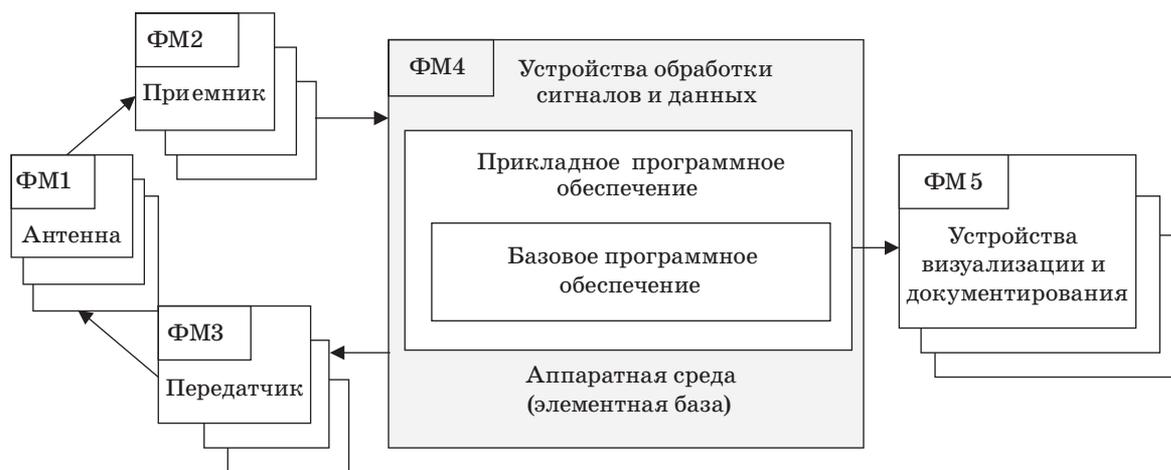
судном связана с рядом проблем, таких как необходимость оперировать большими объемами разнородных геоданных, поступающих от разных источников и зачастую в несовместимых форматах; стесненность площади для реализации инфраструктуры ГИС на судне; отсутствие комплексного подхода проектирования подобных ГИС с учетом существующих ограничений на ее производительность и надежность [6, 7].

## Структурно-функциональная модель ГИС морского судна

Структурно-функциональная модель ГИС управления морским судном может быть представлена в виде трехслойной структуры: внутренний слой соответствует информационному обеспечению, средний — программному обеспечению и внешний — аппаратному обеспечению.

Информационное обеспечение ГИС морского судна определяют картографические данные и данные, необходимые для управления судном, вместе они образуют электронные картографические навигационные информационные системы [1].

Программное обеспечение реализует функциональные возможности ГИС и состоит из ба-



■ *Рис. 1.* Модель аппаратного обеспечения ГИС морского судна  
 ■ *Fig. 1.* The model of ship geoinformation system hardware

зового программного обеспечения, такого как операционные системы, системы управления базами данных, системы визуализации данных и других систем, и прикладного программного обеспечения, предназначенного для решения специализированных задач судовождения, обработки сигналов, обработки и передачи данных и других задач.

Аппаратный слой ГИС представлен шестью функциональными модулями (ФМ), состоящими из устройств и средств [8], реализующих соответствующую функцию (рис. 1).

Транспортной основой распределенной ГИС является локальная вычислительная сеть с коммутацией сегментов, технология построения которой позволяет одновременно передавать данные между всеми взаимодействующими парами клиент-сервер [9–11].

Представим структурно-функциональную модель ГИС морского судна в следующем виде:

$$G = f(P, C, S), \quad (1)$$

где  $P$  — множество параметров, которые задаются как технические требования на функциональные модули ГИС;  $C$  — множество стоимостных характеристик функциональных модулей ГИС;  $S$  — множество пространственных параметров (форм-факторов) функциональных модулей ГИС.

Задачу исследования сформулируем как задачу разработки методического обеспечения для проектирования облика ГИС морского судна под заданные цели плавания с учетом ограничений на требуемые показатели производительности ГИС при работе с актуальными данными.

Выбор облика ГИС решается как целочисленная задача условной многопараметрической оптимизации с ограничениями второго рода по

стоимости, производительности и площади, выделяемой под проект ГИС:

$$C \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $C$  — стоимость ГИС, которая является аддитивной функцией стоимостных характеристик ее составных элементов;

$$\bar{t}_{\text{дост}}(G) \leq T_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где  $\bar{t}_{\text{дост}}(G)$  — среднее время доставки данных клиенту ГИС;  $T_{\text{доп}}$  — ограничения на время доставки, рекомендуемые стандартами распространения пространственных данных;

$$S \leq S_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где  $S_{\text{доп}}$  — ограничения на выделяемые площади под ГИС на судне.

Для приближения архитектуры ГИС к заданному набору свойств (1)–(4) предложена методика, последовательность шагов которой приведена ниже.

### Методика формирования облика ГИС

Методика формирования облика ГИС включает в себя, во-первых, алгоритм решения, обеспечивающий формирование инфраструктуры ГИС, и, во-вторых, приближение архитектуры ГИС к заданному набору свойств.

Алгоритм формирования инфраструктуры ГИС состоит из следующих действий.

1. Определение исходных данных для построения ГИС.

Исходными данными являются назначение объекта и морской район. Установление категории судна позволяет определить количество автоматизи-

рованных рабочих мест (АРМ) и предполагаемый объем геоинформации. Минимальный состав оборудования на судне дает морской район, который в Российской Федерации определяется Глобальной морской системой связи при бедствии.

## 2. Оценка временных характеристик.

Требования к времени обработки информации определяют исходя из времени приема пространственной информации с функциональных модулей ФМ1, ФМ2 и ФМ3 структурно-функциональной модели ГИС. Допустимое время передачи данных  $T_{\text{доп}}$  будет прямо пропорционально удаленности источника распространения сигнала.

Проведенные эксперименты на математических моделях позволяют оценить  $t_{\text{дост}}$  в каждом районе плавания.

3. Определение полного списочного состава элементов с техническими характеристиками, на которых строится ГИС, таких как канал связи и АРМ (процессор, жесткий диск, оперативная память), удовлетворяющими требованию производительности ГИС.

В случае если в списочном составе имеется по одному наименованию элементов, то этот список является единственным сценарием для комплексования аппаратуры, удовлетворяющего требованиям. В обратном случае проводится оптимизация структуры по стоимости и эргономике.

## 4. Определение «узкого» места в структуре ГИС.

При невыполнении директивных требований к передаче данных и обработке информации применяется характеристическое преобразование Лапласа — Стилтеса для определения «узкого» места маршрута от источника  $i$  к приемнику  $j$ . Это «узкое» место является причиной увеличения времени передачи данных [12].

Последовательность действий для приближения архитектуры ГИС к заданному набору свойств такова.

### 1. Анализ исходных данных:

1.1) определение минимального количества АРМ исходя из назначения и категории судна;

1.2) определение минимального состава оборудования в зависимости от морского района плавания;

1.3) определение количества узлов сети в зависимости от морского района плавания.

### 2. Расчет временных характеристик:

2.1) определение времени установления соединения с источником данных;

2.2) определение временных характеристик передачи данных в зависимости от морского района плавания;

2.3) определение времени обработки пространственных данных;

2.4) определение  $t_{\text{дост}}$  до лица, принимающего решение при управлении морским судном, нормируя результаты пп. 2.1–2.3;

2.5) проверка условия ограничения, рекомендуемого стандартами распространения пространственных данных:  $t_{\text{дост}} \leq T_{\text{доп}}$ .

3. Определение полного списочного состава структурно-функциональной модели ГИС:

3.1) определение модели и количества сегментов локальной вычислительной сети исходя из директивных характеристик, установленных в п. 2.1;

3.2) определение вида кабеля исходя из директивных характеристик, установленных в п. 2.1 и 2.2;

3.3) определение списка моделей процессоров, ОЗУ, систем хранения исходя из директивных характеристик, рассчитанных в п. 2.3;

3.4) оптимизация списка оборудования обработки информации на АРМ по стоимостным характеристикам.

4. При невыполнении условия ограничения на время доставки, рекомендуемого стандартами распространения пространственных данных:

4.1) определение участка маршрута, вносящего наибольшую задержку;

4.2) рекомендации замены «узкого» места на другой узел с лучшими характеристиками производительности.

## Особенности реализации экспертной системы

Выбор варианта инфраструктурного решения построения ГИС основан на сценарном подходе, согласно которому поиск решения идет от исходных данных к целевому параметру.

Экспертная система построена по модульному принципу и состоит из следующих компонентов: рабочей памяти, называемой также базой данных, базы знаний, решателя, подсистем приобретения знаний, объяснений и диалога.

База данных состоит из набора таблиц, которые хранят данные о навигационном оборудовании, наличие которого определено в требованиях Глобальной морской системы связи при бедствии, компонентах для формирования сети и наиболее важных компонентах АРМ.

База знаний определяет правила работы экспертной системы и имеет следующую логическую структуру:

— для определения количества АРМ:

ЕСЛИ  $\langle \text{категория судна} \rangle = \langle \text{наименование} \rangle$ ,  
ТО  $\langle \text{количество АРМ} \rangle = n$ ;

— для определения количества узлов и времени доставки данных до приемника:

ЕСЛИ  $\langle \text{морской район} \rangle = A_i, i = \overline{1, 4}$ ,  
ТО  $\langle \text{количество узлов без АРМ} \rangle = N$ ,  
 $\langle \text{время доставки} \rangle = t_{\text{дост}}$ ;

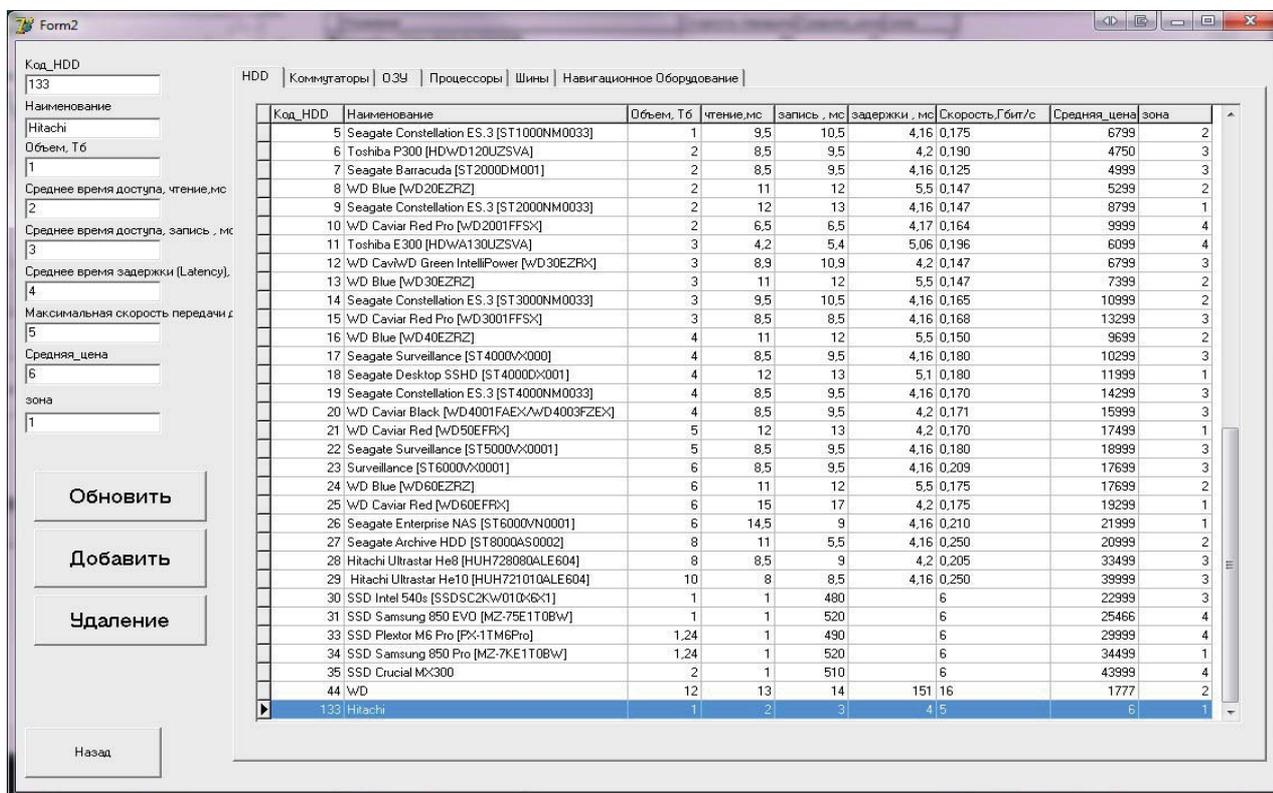
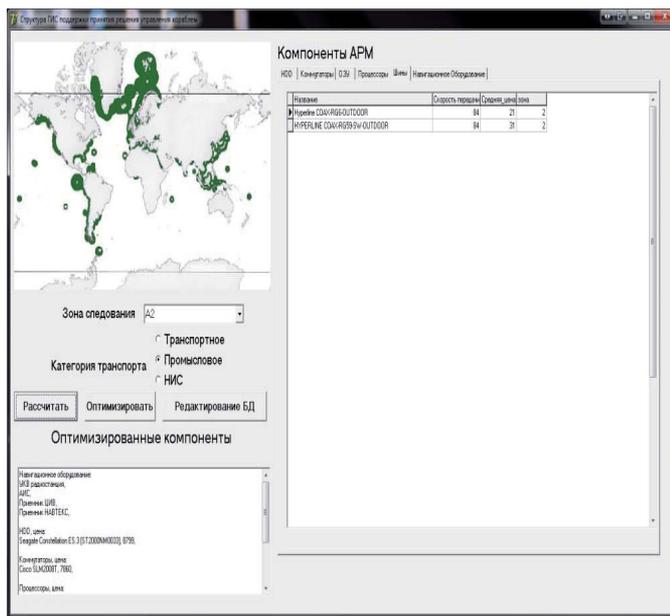
— для определения сценариев:

ЕСЛИ  $\langle \bar{t}_{\text{дост}} \leq T_{\text{доп}} \rangle$ , ТО  $\langle$ вывести полный  
списочный состав аппаратного слоя ГИС $\rangle$ ;

ЕСЛИ  $\langle$ в списочном составе больше  
одного наименования в категориях $\rangle$ ,  
ТО оптимизировать по цене.

Решатель, исходя из определения типа судна и морского района плавания, определяет количество узлов ГИС и оценивает время доставки данных до системы в целях определения ограничений.

Интерфейс экспертной системы предусматривает ввод исходных данных в режиме диалога; выбор района плавания, границы которого визу-



■ Рис. 2. Интерфейс экспертной системы  
■ Fig. 2. Expert system interface

ализируются на карте; выход на решатель и базу данных (рис. 2).

Экспертная система доступна для обновления информации, пополнения новыми правилами, расширения рабочей памяти.

## Заключение

Предложенная структурно-функциональная модель ГИС морского судна отличается описанием иерархии компонентов, поддерживающих функциональность ГИС, что позволяет выполнить структурную оптимизацию ГИС принятия решения при управлении судном под цели плавания.

Для решения задачи формирования инфраструктуры ГИС поддержки принятия решения

при управлении морским судном предложена архитектура ГИС и последовательность действий для приближения этой архитектуры к заданному набору свойств.

Выбор облика ГИС морского судна реализован в виде экспертной системы, автоматизирующей последовательность проектирования ГИС морского судна. Экспертная система позволяет в диалоговом режиме формировать списочный состав функциональных модулей и оборудования ГИС. На основе логики, прописанной в базе знаний, реализовано взаимодействие решателя с рабочей памятью экспертной системы и применение математических моделей по оценке производительности проектируемой ГИС.

## Литература

1. Бурханов М. В., Малкин И. М. Навигация с ЭКНИС. — М.: Моркнига, 2014. — 298 с.
2. Маркелов В. М., Соловьев И. В., Цветков В. Я. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления // Государственный советник. 2014. № 3. С. 42–49.
3. Веселов Н. В., Рогов А. А., Кравчук И. С., Бортник О. А. Экспертное обеспечение транспортной логистики. — М.: Дашков и К°, 2013. — 230 с.
4. Татарникова Т. М., Яготинцева Н. В. Характеристика проблемы интеграции образцов радиоэлектронного вооружения корабля // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 25. С. 156–162.
5. Tatarnikova T., Kolbanev M. Statement of a Task Corporate Information Networks Interface Centers Structural Synthesis // IEEE EUROCON 2009. Saint-Petersburg, 2009. P. 1883–1887.
6. Хейстонен Д. П., Смирнов П. И. Разработка методики учета влияния системы управления на тактико-технические характеристики телекоммуникационной сети специального назначения // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 3. № 3. С. 56–64.
7. Богатырев В. А., Кармановский Н. С., Попцова Н. А., Паршутин С. А., Воронина Д. А., Богатырев С. В. Имитационная модель поддержки проектирования инфокоммуникационных резервированных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5(105). С. 831–838. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838
8. Tonenbaum A., Austin T. Structured Computer Organization. 6th ed. — Prentice Hall, 2012. — 800 p.
9. Tanenbaum A., Wetherall D. Computer Networks. 5th ed. — Prentice Hall, 2010. — 960 p.
10. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. — СПб.: Питер, 2016. — 992 с.
11. Кутузов О. И., Татарникова Т. М. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 134 с.
12. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В. Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 4. С. 46–48.

UDC 004.75

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.52

## Methodological Support of Ship Geoinformation System Formation

Smirnov P. I.<sup>a</sup>, PhD, Tech., info@mashtab.org

Tatarnikova T. M.<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, tm-tatarn@yandex.ru

Yagotinceva N. V.<sup>c</sup>, Senior Lecturer, solnishko234@yandex.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>c</sup>Russian State Hydrometeorological University, 98, Malookhtinsky Pr., Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Developing a geoinformation control system for a sea-going vessel is a complex step-by-step process characterized by a combined application of stages at which its architecture is automatically generated, and expert solutions. **Purpose:** Providing

methodological support for the formation of a geoinformation system layout by sequentially approximating its architecture to a given set of properties. **Results:** A structural and functional model is proposed for a ship geoinformation control system a quantitative and qualitative description of which allows you to perform structural optimization of the system for navigation purposes. A technique is developed for forming the layout of a ship geoinformation control system, which comprises a sequence of actions to approximate the system architecture to a given set of properties. An expert system is developed to choose a ship geoinformation system layout in the framework of the proposed design methodology verification, which allows you to interactively form a list of necessary equipment and functional modules for the system. **Practical relevance:** An expert system can be useful in the development of integrated control systems for marine dynamic objects.

**Keywords** — Geoinformation System of a Dynamic Object, Structural and Functional Model, Quantitative and Qualitative Characteristics, Geoinformation System Layout Formation Technique, Expert System for Forming Geoinformation System Layout.

## Reference

1. Burhanov M. V., Malkin I. M. *Navigatsiia s EKNIS* [Navigation with ECDIS]. Moscow, Morkniga Publ., 2014. 298 p. (In Russian).
2. Markelov V. M., Solovyov I. V., Cvetkov V. Ya. Intelligent Transport Systems as a Management Tool. *Gosudarstvennyy sovetnik*, 2014, no. 3, pp. 42–49 (In Russian).
3. Veselov N. V., Rogov A. A., Kravchuk I. S., Bortnik O. A. *Ekspertnoe obespechenie transportnoi logistiki* [Expert Logistics of Transport Logistics]. Moscow, Dashkov i K' Publ., 2013. 230 p. (In Russian).
4. Tatarnikova T. M., Yagotinceva N. V. Problem Description of Ship Armament Radio Electronic Standards Integration *Uchenye zapiski RGGMU*, 2012, no. 25, pp. 156–162 (In Russian).
5. Tatarnikova T., Kolbanev M. Statement of a task Corporate Information Networks Interface Centers Structural Synthesis. *IEEE EUROCON 2009*, Saint-Petersburg, 2009, pp. 1883–1887.
6. Hejstonen D. P., Smirnov P. I. Development of a Methodology for Influence Accounting of the Control System on the Tactical and Technical Characteristics of a special purpose Telecommunications Network. *Voprosy radioelektroniki*, 2013, vol. 3, pp. 26–30 (In Russian).
7. Bogatyrev V. A., Karmanovsky N. S., Poptcova N. A., Parshutina S. A., Voronina D. A., Bogatyrev S. V. Simulation Model for Design Support of Infocomm Redundant Systems. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mehaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2016, vol. 16, no. 5, pp. 831–838 (In Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838
8. Tonenbaum A., Austin T. *Structured Computer Organization*. 6th ed. Prentice Hall, 2012. 800 p.
9. Tanenbaum A., Wetherall D. *Computer Networks*. 5th ed. Prentice Hall, 2010. 960 p.
10. Olifer V., Olifer N. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2016. 992 p. (In Russian).
11. Kutuzov O. I., Tatarnikova T. M. *Modelirovanie sistem i setei telekommunikatsii* [Simulation of Systems and Telecommunications Networks]. Saint-Petersburg, RGGMU Publ., 2012. 134 p. (In Russian).
12. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. Evaluation of Reliability Performance Cluster Real-Time Query. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 46–48 (In Russian).

# МОДЕЛЬ СЦЕНАРИЯ ДЕГРАДАЦИИ КАСПИЙСКОЙ СЕВРЮГИ С ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ

Т. Н. Соловьева<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

А. Ю. Переварюха<sup>б</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** деградации запасов ценных промысловых рыб способны развиваться стремительно, но с различными динамическими аспектами. Действие пороговых эффектов может совмещаться с естественными для популяций режимами переходных аperiodических флуктуаций либо устойчивых циклических колебаний. Сочетание нелинейных механизмов регуляции биосистем становится частью общей проблемы организации управления промыслом и при недостатках методов учета осложняет своевременный прогноз деградации. Анализ группы подобных ситуаций требует специфических сценарных моделей. **Цель исследования:** создание сценарных моделей для оперативного прогноза деградации запасов ценных промысловых рыб. **Результаты:** разработана модель формирования численности поколений с использованием уровня отклонения для показателя скорости размерного развития на ранних этапах онтогенеза, что важно для неоднородно распределенной в ареале Каспия и генетически дифференцированной популяции севрюги. Получена зависимость воспроизводства, предполагающая существование устойчивого циклического аттрактора в области, ограниченной репеллерной точкой, но не отвечающая критериям стандартного каскада бифуркаций удвоения периода. Показано, что чрезмерный промысел изменяет параметры колебательного режима, значительное время сохраняющего устойчивость при превышении критического уровня изъятия. **Практическая значимость:** разработанная модель позволила описать особенность сценария быстрого истощения промысловых запасов из состояния естественных флуктуаций при ситуации длительного поддержания высокой эффективности воспроизводства в отдельных локальных группах рыб.

**Ключевые слова** — гибридные динамические системы, нелинейные модели популяций, сценарии коллапса биоресурсов, циклы неунимодальных итераций.

## Введение

Наблюдаемые с начала 1980-х гг. случаи стремительного сокращения рыбных запасов представляют существенную проблему для экономики приморских регионов. Негативное развитие происходит из состояния популяции, которое оценивается как вполне благополучное, а расчетные сроки восстановления популяции оказываются ошибочными. В связи с разнообразием сопровождающих переход к деградации нелинейных аспектов возникает задача значительной корректировки принципов теории рационального управления биоресурсами, так как такие случаи происходят даже при ведении регулируемого промысла, нацеленного на оптимизацию прибыли.

На основании доступных для изучения графиков промысловой статистики объектов добычи можно сделать вывод, что непосредственно перед моментом «краха» рыболовства фаза процесса, который в современной литературе называют «коллапс», может выглядеть качественно различно. Расхождения могут наблюдаться для таксономически родственных видов рыб, что еще более затрудняет прогнозирование. Механизмы регуляции воспроизводства вариативны как результат длительной адаптации видов и экологи-

чески пластичны, потому говорить об обобщенной модели ситуаций коллапса затруднительно. В связи с этим авторами применяется классифицирующий характерные признаки сценарный подход к моделированию варианта процесса деградации.

При математической формализации деградации представляется перспективным учитывать внутренние закономерности балансирования численности популяций, которые при внешнем воздействии ведут к нарастанию исходной неустойчивости. Одним из важных скрытых механизмов балансирования численности являются популяционные циклы, свойственные многим биологическим видам и целым сообществам. Примером популяционных циклов являются колебания численности канадских зайцев, которые, как известно, могут происходить без участия хищников (рысей) и определяются способностью к восстановлению повреждаемой зайцами растительности. В рыбном промысле наиболее известны, но полностью не изучены сельдяные циклы — периодическое возрастание или полное отсутствие уловов тихоокеанской сельди. Роль индукторов и принципов демпфирования последующих пиков часто оказывается нераскрытой у подобных явлений. Для долгоживущих видов циклы прослеживаются в меньшей степени, но

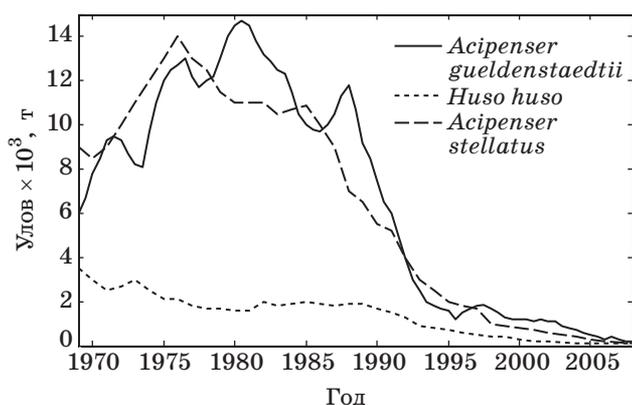
оказывают значительную роль при прогнозировании возможностей промысла.

В статье предлагается оригинальная модель эффективности воспроизводства для промысловой популяции с адаптивным механизмом возникновения цикличности.

### Динамические аспекты деградации севрюги и белуги

В работе [1] описана модель деградации, возникающей в связи с серией сезонов повышения уловов и пороговыми изменениями в эффективности воспроизводства. Идея предполагала существование для запасов осетра нетривиально достигнутого стабильного равновесия при высокой численности, а также присутствие трех неустойчивых промежуточных точек равновесия, выполняющих роль двигающихся порогов. В такой модели бифуркация, редуцирующая точку стабильного равновесия, запускает фазу растянутой деградации. Динамику продолжительной деградации экологически можно объяснить существенной внутривидовой дифференциацией запаса в форме сезонных репродуктивных рас: изменялся режим эксплуатации и в том числе сроки, что варьировало выживаемость и успех размножения отдельных репродуктивных групп. При интенсивном нерациональном промысле для каждой локальной группы мог быть отмечен пик уловов.

Сценарий с временной хаотизацией представляется не единственным вариантом развития деградации. Для трех популяций осетровых рыб Каспийского моря динамика деградации оказалась различной [2] (рис. 1). Наиболее тривиально сценарий выглядит для белуги *Huso huso*. Деградация этого вида происходит в фор-



■ **Рис. 1.** Отличие коллапса от перелома: динамика уловов севрюги и белуги Каспия

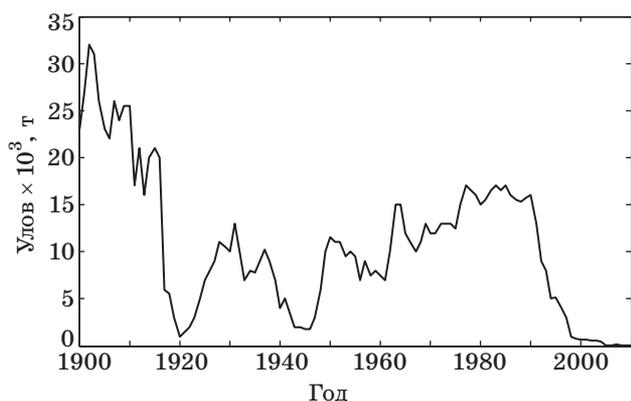
■ **Fig. 1.** The difference between collapse and overfishing: dynamics of catches of stellate sturgeon and beluga of the Caspian Sea

ме монотонного сокращения на всем интервале времени наблюдений без нелинейных эффектов. Эффективность воспроизводства волжской севрюги *Acipenser stellatus* и русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* менялась более отчетливо. С биологической точки зрения наблюдаемые существенные отличия динамики улова у родственных видов объясняются повышением внутривидового разнообразия, что является общим эволюционным трендом для особей, находящихся в замкнутом ареале и с ограниченными ресурсами речных нерестилиц. Показано, что внутривидовые иммунохимические различия у субпопуляций теплолюбивой севрюги выражены отчетливо в реках размножения [3].

Динамику деградации каспийской белуги (см. рис. 1) можно трактовать как характерную для явления «перелома», тогда как для севрюги и осетра наблюдаются основные признаки коллапса. Уловы волжской севрюги колебались значительно: на 60 % за годы относительного благополучия ее запасов [2]. Столь же существенно изменялись показатели эффективности воспроизводства по наблюдениям скатывающейся молодежи до 2007 г., когда численность нерестового запаса сократилась до критической отметки для выживаемости популяции. Перед быстрой фазой 1989–90 г. перехода к необратимой деградации прогнозировалось дальнейшее незначительное увеличение допустимого вылова. Гидрологическая обстановка за всю декаду 1980-х гг. считалась благоприятной для размножения осетровых рыб, и происходил подъем уровня Каспия [4]. Крайне запоздалый запрет коммерческого промысла при том, что сопутствующие перелому эффекты измельчания и ускоренного созревания отмечались специалистами и раньше, пока никак не сказался на восстановлении запасов.

Динамика данных промысловой статистики для севрюги существенно отличается от сценария самого известного коллапса атлантической трески 1992 г., крупной рыбы, обладающей сравнительно большой продолжительностью жизни (20–25 лет). В Канаде после выраженного максимума в 1972 г. уловы трески столь же быстро сократились для среднесезонного минимума, к 1983 г. прошли депрессию, а затем через фазу декады неустойчивых колебаний внезапно полностью закончились. Сценарий такого израсходования вполне был объясним для промысла короткоцикловых рыб, но не укладывался в существовавшие представления об эксплуатации многовозрастного запаса.

Интересно, что показатели суммарного объема вылова всех трех видов осетровых на территории современной России можно отнести к сценарию коллапса через фазу неустойчивых аperiodических колебаний, реализовавшемуся для атлан-



■ **Рис. 2.** Суммарная динамика вылова осетровых рыб в водах России в XX в.  
 ■ **Fig. 2.** The overall dynamics of sturgeon fish in Russian waters in the XX century

тической трески, но если рассматривать данные по общим уловам с начала XX в. (рис. 2).

Минимумы вылова связаны с военным временем. Ослабление промысла непреднамеренно пролонгировало процесс истощения общих запасов осетровых, который, тем не менее, обнаружился также внезапно, как и для трески у побережья Лабрадора.

Рассмотрим модель, модифицированную для описания сценариев изменения численности каспийской севрюги, где естественным состоянием популяции служит колебательная динамика.

### Формулировка новой модели воспроизводства

Базовая модель [1] описания убыли численности от  $N(0)$  до  $R = N(T)$  представляет собой систему из двух уравнений на отрезке времени  $t \in [0, T]$ , составляющем интервал уязвимости для популяции с нерестовым запасом  $S$ :

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -(\alpha w(t)N(t) + \theta(S)\beta)N(t); \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{N^k(t) + \sigma}, \theta(S) = \frac{1}{1 - e^{-cS}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $w(t)$  — вспомогательный параметр индивидуального развития поколения, отражающий изменения пищевых потребностей по мере развития особей;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты смертности;  $k \in [1/2, 2/3]$ .

Начальные условия для уравнения (1) имеют вид  $N(0) = \lambda S$ ,  $w(0) = w_0$ , где  $\lambda$  — показатель средней плодовитости.

Модель (1) как оператор эволюции функциональной итерации  $R_{n+1} = \psi(R_n)$  для величины пополнения  $R$  была предназначена преодолеть недостатки применявшихся ранее нелинейных

моделей воспроизводства Рикера и Шепарда, связанных в том числе со свойствами перехода к хаотическому аттрактору через каскад бифуркаций удвоений Фейгенбаума, которые очень сложно биологически интерпретировать. У полярных грызунов известны циклы периода  $p = 4$ , но составляющие их значения монотонно возрастающие, тогда как новые точки циклов в бифуркациях удвоения появляются по обе стороны от точки, потерявшей устойчивость. Редукция периода  $2^i \rightarrow 2k + 1$  невозможна, хотя для грызунов отмечены переходы к нечетным циклам.

Применяя решение задачи Коши (1) в качестве оператора эволюции  $\psi^n$ , удалось нарушить один из критериев возникновения бесконечных удвоений периода цикла  $p = 2^i$ ,  $i \rightarrow \infty$ , сохранив единственный экстремум зависимости  $R_m = \max \psi(S)$ , и получить необходимое для биосистем свойство бистабильности гибридной траектории:

$$\begin{aligned} \forall x \in \Omega_1 \subset \mathbb{R}^+ : \lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(x) &= 0, \\ \forall y \in \Omega_2 \subset \mathbb{R}^+ : \lim_{n \rightarrow \infty} \psi^n(y) &= R^*, \\ \partial_{\mathbb{R}} \Omega_1 \equiv \partial_{\mathbb{R}} \Omega_2 &= R_1 < R^*. \end{aligned}$$

Система уравнений, численное решение которой привело к динамической системе с двумя аттракторами, предполагалась для целенаправленных модификаций. В предыдущем варианте [1] для динамики промысла и воспроизводства осетра использовался показатель  $w(t)$  для определения момента перехода между выделенными эколого-физиологическими стадиями развития. На основе гибридного автомата были реализованы таймированный и два условных перехода, где показатель развития был включен в предикат точки переопределения правой части  $w_d$ , которые описывали темпы убыли численности поколения уравнениями

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha w(t)N(t) + U(S)\beta)N(t), & t < \tau; \\ -(\alpha_1 N(\tau) + \beta)N(t), & w(t) < w_d, (\tau_1); \\ -\left(\alpha_2 \frac{N(\tau_1)}{w(\tau_1)}\right)N(t), & \tau_1 < t < T. \end{cases} \quad (2)$$

Метод позволял быстро вычислять смену режима поведения гибридной системы согласно карте переходов с соответствующим перерасчетом новых начальных условий для выбранной следующей формы правой части. В (2)  $\alpha_i$  — последовательно сокращающиеся коэффициенты зависящей от плотности «компенсационной» смертности;  $\beta$  — коэффициент нейтральной убыли. От агрегированного репродуктивного «маль-

тузианского» потенциала в известных подобных моделях было решено перейти к естественному показателю средней плодовитости  $\lambda$ . Изменена была по сравнению с (1) и форма триггерной функции  $U(S)$  для описания отрицательного эффекта агрегированной группы, что позволило получить два дополнительных промежуточных состояния равновесия.

Показатель развития был описан для динамически переопределяемой вычислительной структуры условным образом, исходя из расчета конкуренции потребителей ресурсов. Важнейший этап формирования промыслового пополнения, где изменение убыли на 1,5 % уже является существенным, определяется как градуированный интервал уязвимости. Система последовательно исключает из расчетов для старших стадий развития триггерную функцию  $U$  и составляющую декомпенсационного фактора смертности  $\beta$ . Отметим, что и в реальности темпы развития не остаются постоянными на интервале времени в раннем онтогенезе.

Для выражения скорости развития существуют известные балансовые модели. Однако непосредственно в модели убыли численности их применить не представляется целесообразным, так как это кривые асимптотического роста, и они не учитывают факторы конкуренции. В рассматриваемом случае нельзя исключать фактор взаимодействия внутри группы, так как существуют факты, которые трудно объяснить иначе. Например, ихтиологами отмечалось [5], что процент промыслового возврата при небольших объемах выпуска заводской молоди в 1970-е гг. был значительно выше, чем при массовой интродукции. В итоге эффективность искусственной интродукции оказалась значительно меньше ожидаемой по оптимистичным планам.

### Модель с фактором отклоняющегося развития

В естественной среде есть оптимальная скорость развития. Отклонения от этой скорости в основном не способствуют выживаемости особи. Для анадромных рыб, размножение и первые этапы онтогенеза которых проходят в пресной воде, важно своевременное прохождение смолтификации, когда все системы органов молоди адаптируются к переходу к долгой миграции в условиях более высокой солености Южного Каспия. Оптимальную скорость зададим, взяв за основу известное уравнение Берталанфи, где указан общий баланс для соотношения эффективности анаболизма  $\eta$  и катаболизма  $\vartheta$ :

$$\frac{dW}{dt} = \eta \sqrt[3]{W^\zeta(t)} - \vartheta W^\sigma(t). \quad (3)$$

Для вычислительных исследований (3) предоставляет достаточную вариативность. Оно используется обычно в частном решении, случае  $\sigma = 1$ , причем для рыб считают  $\zeta = 2$ :

$$W_t = \left( \frac{\eta}{\vartheta} - \left( \frac{\eta}{\vartheta} - \sqrt[3]{W_0} \right) e^{-\frac{\vartheta t}{3}} \right)^3.$$

Описание прироста одной зависимостью накопления и распада биомассы на протяжении всего жизненного цикла не представляется биологически обоснованным, потому для ранних стадий онтогенеза молоди показатели могут варьироваться, и  $\sigma$  может отличаться от единицы.

Целесообразно рассмотреть влияние конкуренции внутри группы на динамику индивидуального развития. Внесем влияние, оказываемое плотностью скопления на показатели эффективности анаболизма:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\eta}{\xi v(N(t))} \sqrt[3]{w^\zeta(t)} - \vartheta w^\sigma(t), \quad (4)$$

где давление конкуренции за пищевые ресурсы в группе задается функцией с двумя экстремумами:

$$v(N) = \frac{N}{ze^{-bN}(Pe^{-bN} + 1)}.$$

Значения, соответствующие минимуму  $v(N)$ , будем считать оптимальными, а локальный максимум функции в данном случае можно объяснить, если обратиться к обработке результатов наблюдений [6], опровергающих однозначное мнение об ускорении темпов развития и увеличении сопутствующих морфометрических характеристик при малой плотности молоди волжской севрюги в выростных водоемах.

Включим показатель отклонения от идеального развития в форме, заведомо не меняющей знак слагаемого в правой части:  $\Delta_{W_t} = \sqrt{(W(t) - w(t))^2}$ , модифицировав первое уравнение убыли гибридной системы:

$$\frac{dN}{dt} = -(\alpha \Delta_{W_t} N(t) + \beta \Psi(S)) N(t).$$

Триггерную функцию, отражающую действие эффекта Олли на эффективность нереста с необходимым свойством  $\lim_{S \rightarrow \infty} \Psi(S) = 1$ , определим следующим образом:

$$\Psi(S) = 1 + e^{-\kappa S^2}.$$

Предположим, что происходит изъятие некоторой доли запаса  $h$ . В этом случае началь-

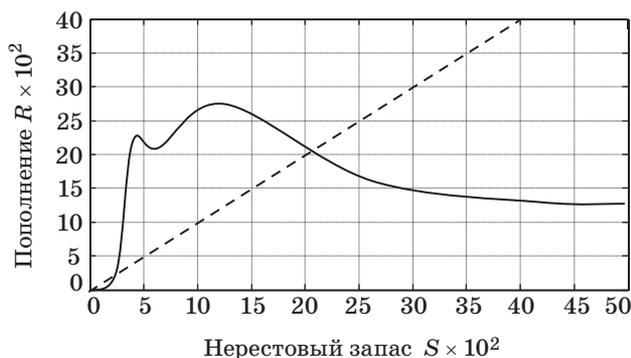
ные условия для уравнения убили примут вид  $N(0) = \lambda(1 - h)S$ . Рассмотрим реакцию модели на данное воздействие.

**Вычислительное исследование сценария деградации**

Ранее все практические применения теории формирования пополнения исходили из наличия максимума эффективности воспроизводства. Фактически разнообразие типов функций  $R = f(S)$  можно представить в обобщенной форме  $R = aS/(1 + S/K)^\gamma$ . С помощью описанного подхода удалось получить при численном решении уравнений агрегированной гибридной системы ненулимодалную зависимость с локальным минимумом, но сохраняющую традиционный с точки зрения общей теории формирования пополнения вид «куполообразной» формы кривой воспроизводства. При этом на графике (рис. 3) сохраняются при ненулевой горизонтальной асимптоте два нетривиальных пересечения зависимости с биссектрисой координатного угла (на рис. 3 отмечена пунктиром) — геометрическим местом стационарных точек.

По наклону касательной очевидно, что значение производной в стационарной точке не удовлетворяет критерию устойчивости  $|\dot{\psi}(R^*)| < 1$ . Данный критерий устойчивости положений равновесия для дискретных динамических систем выводится из теоремы Зигеля о линеаризации [7]. В критическом случае при  $|\dot{\psi}(R^*)| = 1$  возможно сохранение устойчивости, например, в итерациях модели воспроизводства Рикера  $x_{n+1} = ax_n e^{-bx_n}$  при значении  $a = e^2$  стационарная точка  $x^* = \ln(a/b)$  сохраняет устойчивость.

Аттрактором для области  $\Omega_1$  по-прежнему является устойчивая точка начала координат. Для области  $\Omega_2$  траектория зависимости в параметрической форме (см. рис. 3) образует простой коле-



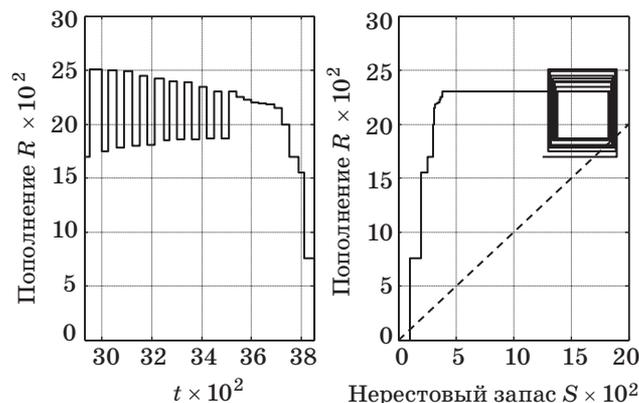
■ **Рис. 3.** Неунимодальная «куполообразная» зависимость эффективности воспроизводства  
 ■ **Fig. 3.** Nonunimodal “domed” dependence of reproductive efficiency

бательный режим, формирующий на диаграмме Ламмерея характерный прямоугольник (рис. 4). Полученная зависимость очень благоприятна для рационально ведущегося промысла, даже более выгодна, чем функция пополнения Рикера. Несмотря на богатые возможности изъятия излишнего прироста, модель получает неоднозначные особенности с точки зрения практики управления режимом эксплуатации биоресурсов.

В непрерывно-дискретной системе с величиной доли изъятия  $h$  начальные условия на концах непрерывных временных интервалов будут сопрягаться:  $N_{n+1}|_{t=0} = (1 - h)\lambda N_n|_{t=T}$ .

В условиях наличия промыслового воздействия центр цикла будет смещаться по диагонали влево (см. рис. 4). В сценарии, когда уровень промыслового воздействия уже незначительно превышает оптимальный для эксплуатации, популяция продолжает длительное время поддерживать высокие среднемноголетние уловы  $Y_n = hR_n$ . Популяционная динамика с затухающими колебаниями создает иллюзию благополучия, что служит обоснованием для дальнейшего увеличения квоты вылова, которое становится уже критическим.

В модельном сценарии происходящее понижение уловов трактуется как обычный ход колебаний запаса. В следующем промежутке времени ожидается повышение уловов вслед за естественными флуктуациями, но в этот момент никакого устойчивого цикла для возмущенной динамической системы уже не существует. В вычислительном эксперименте оказывается, что при  $\bar{h} = 71\%$  изъятия популяция выдерживает при сохранении слабовыраженных осцилляций, но при  $72,7\%$  происходит деградация (см. рис. 4).



■ **Рис. 4.** Сценарий деградации популяции из колебательного режима: временная диаграмма пополнения (слева); диаграмма Ламмерея (справа)  
 ■ **Fig. 4.** Scenario of population degradation from the oscillatory regime: time chart of the replenishment (left), Lammerey diagram (right)

В случае осетровых рыб промысел, как оказалось, не мог поддерживать заранее определенный уровень изъятия, потому из-за технологии неводного лова в маловодные годы изъятие оказывалось существенно больше [8].

Сценарий демонстрирует вариант деградации, начинающейся в момент, когда ожидается выход на промежуточный пик в естественных популяционных флуктуациях. Реальность практики управления эксплуатацией биоресурсов и методов оценки промыслового запаса такова, что динамика уловов с регулярными флуктуациями (не превышающими  $1/3$  величины среднегодовой величины уловов) оказывается весьма опасным состоянием, так как в некоторый момент возникает естественное стремление получить улов еще больше. Перспективно и заманчиво оптимизировать затраты и максимизировать прибыль от эксплуатации объекта, и этой задаче посвящено много теоретических работ, обычно с использованием некоторого фиксированного репродуктивного потенциала. Если запасы недоиспользуются и у промысла есть все возможности интенсифицировать эксплуатацию, повысив изъятие  $h + \Delta h$ , в момент, когда уровень изъятия лишь немного превысит допустимое значение  $1,01\bar{h}$ , промысел получит регулярные высокие уловы длительное время (рис. 5). Последующее снижение уловов трактуется экспертами следствием естественных причин, потому даже возвращение к исходному уровню уже не останавливает необратимую деградацию.

С течением времени траектория преодолевает неустойчивое положение равновесия. Точка на кривой, безусловно, является математической абстракцией, а в реальности она представляет собой размытый интервал, поэтому положение траектории над или под биссектрисой вероятно. Таким образом, с каждым шагом итерации в этой

области все более уязвимым становится естественное воспроизводство, эффективность которого теперь определяется случайными встречами незначительного количества нерестовых пар. Прекращение естественных осцилляций, как ни странно это отметить, в данном сценарии служит тревожным сигналом для промысла. В рассмотренном нами предыдущем модельном сценарии для осетра [1] реакции на чрезмерный уровень эксплуатации предшественниками деградации становились именно появляющиеся аperiodические колебания значительной амплитуды.

### Заключение

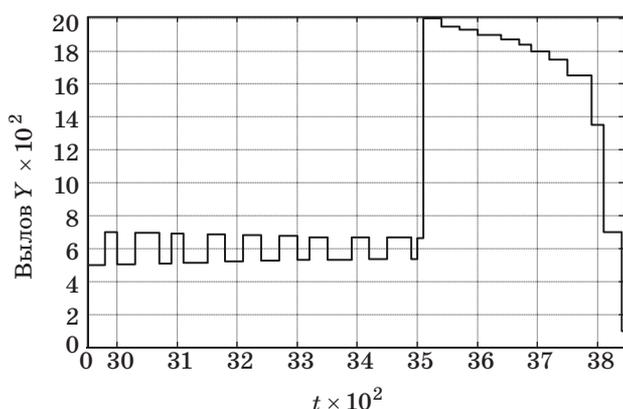
Построенная новая математическая модель деградации позволяет получить зависимость эффективности воспроизводства, занимающую промежуточное положение между выраженной бимодальной кривой и классической куполообразной формой кривой в теории пополнения, обоснованной в работе [9]. Отличием предложенной модели является учет влияния темпов развития на изменение убыли численности на стадиях онтогенеза.

Наличие локальных экстремумов в полученной кривой эффективности воспроизводства — важная характеристика. Локальные экстремумы позволяют выйти за рамки теоремы Сингера [10], которая говорит о единственно возможном притягивающем множестве для итерации унимодального отображения с отрицательным дифференциальным инвариантом Шварца.

В качестве итерационной системы  $\psi^n(R_0)$  предложенная модель обладает широкими параметрическими возможностями для метаморфозов с появлением всех возможных видов бифуркаций, как прямых, так и обратных. Реализуется не бесконечный каскад удвоений с образованием канторовского аттрактора при увеличении параметра, но после нарастания периода  $2^i$  происходят обратные бифуркации  $p = 2^{i-1}$  при увеличении данного параметра. Данный вид изменения поведения траектории определяется как «paired cascade» [11].

Далеко не все параметрические диапазоны модели имеют адекватную биологическую интерпретацию, но в данном случае в вычислительных исследованиях выходящие за рамки интерпретации значения можно без особого труда разграничить. Модель демонстрирует колебательный режим в биологически обоснованном диапазоне параметров, факторов формирования пополнения, но в величине уловов регулярные колебания будут отражаться только при незначительном уровне изъятия.

В вычислительном сценарии при введении нового уровня изъятия, превышающего крити-



■ Рис. 5. Динамика уловов в сценарии интенсификации промысла

■ Fig. 5. Dynamics of catches in the intensification scenario of the fishery

ческий, достаточно долгое время не наблюдается отчетливых признаков перелома, что соответствует реальности. Публикуемая общая промысловая статистика не может дать адекватного представления о состоянии популяции. В сложной динамике необходимо анализировать показатели улова в расчете на промысловое усилие, количество поимок за единицу времени работы орудия лова. Промысел будет компенсировать разреженность уже малочисленного запаса за счет интенсификации. В момент времени, когда уловы вернулись к прежнему уровню при сохраняющемся промысловом усилии (количестве проводимых тралений), необходимо немедленно вводить мораторий на промысел. В работе [8] отмечается, что в отдельные годы изъятие из нерестового запаса севаго доходит до  $h = 0,89$ . Подобные оценки, как оказывается в реальности, можно получить

только после израсходования промыслом поколений. Потому регулирование рыболовства путем установления квот вылова представляется методом, не спасающим от моделируемого нами развития деградации обильных запасов.

Перспективы восстановления популяции связаны с большей сохранностью частично изолированных субпопуляций, менее подверженных промыслу и не генерирующих автоколебания. Гипотетически указанные различия в свойствах функций эффективности воспроизводства у трех видов осетровых рыб Каспия возникли в ходе вынужденного увеличения эволюционного разнообразия при ограниченных ресурсах замкнутого ареала, выразившегося в диверсификации нерестового поведения.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ для молодых ученых № 16-37-00028.

## Литература

1. Соловьева Т. Н., Переварюха А. Ю. Динамическая модель деградации запасов осетровых рыб со сложной внутривидовой структурой // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 60–67. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.60
2. Рубан Г. И., Ходоревская Р. П., Кошелев В. Н. О состоянии осетровых в России // Астраханский вестник экологического образования. 2015. № 1. С. 42–50.
3. Переварюха Ю. Н., Гераскин П. П., Переварюха Т. Ю. Сравнительный иммунохимический анализ внутривидовых особенностей сывороточных белков севаго *Acipenser stellatus* (Acipenseriformes, Acipenseridae) Каспийского бассейна // Вопросы ихтиологии. 2011. № 3. С. 405–410.
4. Гутенева Г. И., Фомин С. С., Дедикова Т. Н. Влияние волжского стока на естественное воспроизводство осетровых рыб // Рыбное хозяйство. 2015. № 3. С. 103–105. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.60
5. Ходоревская Р. П. Значение естественного нереста и искусственного осетроводства в формировании запасов осетровых Каспийского моря // Астраханский вестник экологического образования. 2015. № 2. С. 74–89.
6. Рябова Г. Д., Климонов В. О., Афанасьев К. И. и др. Изменчивость морфометрических и генетических характеристик молоди севаго при выращивании в прудах с различной плотностью посадки // Генетика. 2006. № 2. С. 244–255.
7. Арнольд В. И. Геометрические методы в теории обыкновенных дифференциальных уравнений. — М.: МЦНМО, 2012. — 384 с.
8. Лепилина И. Н., Довгопол Г. Ф., Коноплева И. В. Оценка влияния водности на миграцию осетровых рыб в Каспийском бассейне // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2013. № 2. С. 32–39.
9. Ricker W. E. Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations // Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada. 1975. N 119. P. 1–382.
10. Singer D. Stable Orbits and Bifurcations of the Maps on the Interval // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1978. N 35. P. 260–268.
11. Sander E., Yorke J. Connecting Period-Doubling Cascades to Chaos // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2012. N 2(22). P. 22–38.

UDC 639.215.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.58

### Model of Caspian Stellate Sturgeon Stock Depletion with Cyclic Component of Population Dynamics

Solov'eva T. N.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, al2tn@yandex.ru

Perevaryukha A. Yu.<sup>b</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, madelf@pisem.net

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The depletion of commercial fish stocks can develop rapidly but with various dynamic aspects. Threshold effects can combine with natural population regimes: transient aperiodic fluctuations or stable cyclic oscillations. The combination of non-linear

mechanisms for biosystem regulation becomes a part of the systemic problem of organizing fishery management. This complicates the timely prediction of the depletion with all the shortcomings of the accounting methods. Analysis of a group of similar situations requires specific scenario models. **Purpose:** Creating scenario models for operational forecasting of valuable fish stock depletion. **Results:** A model is developed which determines the number of generations, using the deviation degree for the speed indicator of dimensional development at the early ontogeny stages. This is important for the Caspian stellate sturgeon population which is unevenly spread and genetically differentiated. A reproductive dependence is obtained, which presupposes the existence of a stable cyclic attractor in a region bounded by a repeller point. However, this dependence does not meet the criteria of a standard cascade of period-doubling bifurcations. Excessive fishing changes the parameters of the oscillatory regime which can stay stable for a considerable time when the critical level of seizure is exceeded. **Practical relevance:** The developed model made it possible to describe the peculiarity of the situation when a commercial fish stock gets rapidly depleted from the state of natural fluctuations with the effect of long preservation of high reproductive efficiency in separate local groups of sturgeons.

**Keywords** — Hybrid Dynamical Systems, Nonlinear Models of Populations, Bioresource Collapse Scenarios, Nonunimodal Iteration Cycles.

### References

1. Solov'eva T. N., Perevaryukha A. Y. Dynamic Model of Depletion of Sturgeon Stocks with Complex Intrapopulation Structure. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 60–67 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.60
2. Ruban G. I., Hodorevskaja R. P., Koshelev V. N. On the Status of Sturgeon in Russia. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniia*, 2015, no. 1, pp. 42–50 (In Russian).
3. Perevaryukha Y. N., Geraskin P. P., Perevaryukha T. Y. Comparative Immunochemical Analysis of Intraspecific Features of Serum Proteins of Sturgeon *Acipenser Stellatus* (Acipenseriformes, Acipenseridae) Caspian. *Voprosy ikhtologii*, 2011, no. 3, pp. 405–410 (In Russian).
4. Guteneva G. I., Fomin S. S., Dedikova T. N. The Influence of the Volga Flow on Natural Reproduction of Sturgeon. *Rybnoe khoziaistvo*, 2015, no. 3, pp. 103–105 (In Russian).
5. Khodorevskaya R. P. The Value of the Natural Spawning and Artificial Breeding of Sturgeon in the Formation of Reserves of the Sturgeon of the Caspian Sea. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniia*, 2015, no. 2, pp. 74–89 (In Russian).
6. Ryabova G. D., Afanasev K. I., Moskaleichik F. F., et al. Variation in Morphometric and Genetic Characteristics of Stellate Sturgeon Juveniles Raised at different Densities. *Russian Journal of Genetics*, 2006, no. 2, pp. 182–191.
7. Arnold V. I. *Geometrical Methods in the Theory of Ordinary Differential Equations*. New York, Springer, 1988. 341 p. doi: 10.1007/978-1-4612-1037-5
8. Lepilina I. N., Dovgopol G. F., Konopleva I. V. Assessment of the Impact of Water Availability on Sturgeon Migration in the Caspian Basin. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Pri-kaspiia*, 2013, no. 2, pp. 32–39 (In Russian).
9. Ricker W. E. Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, 1975, no. 119, pp. 1–382.
10. Singer D. Stable Orbits and Bifurcations of the Maps on the Interval. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1978, no. 35, pp. 260–268.
11. Sander E., Yorke J. Connecting Period-Doubling Cascades to Chaos. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2012, no. 2(22), pp. 22–38.

## ОБЗОР СТАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ СПЕЦИФИКАЦИЙ ПРОГРАММНЫХ БИБЛИОТЕК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОГРАММНЫХ ПРОЕКТОВ

И. С. Егорова<sup>а</sup>, аспирант

В. М. Ицыксон<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** широкое использование сторонних библиотек и фреймворков в процессе разработки программного обеспечения и отсутствие исчерпывающей документации, специфицирующей их применение, делают актуальной задачу построения формальных спецификаций библиотек. Из-за отсутствия документации необходимы методы, позволяющие восстановить такие спецификации на основе множества успешных примеров применения библиотек в открытых проектах по разработке программного обеспечения. **Цель исследования:** анализ и классификация перспективных подходов к автоматизированному извлечению спецификаций программных библиотек, реализуемых на основе статических методов. **Результаты:** произведен обзор, классификация и сравнение различных формализмов, которые используются для описания библиотечных компонентов. Выявлено, что наиболее выразительные комплексные спецификации, позволяющие захватывать как временные свойства, так и ограничения на данные, используемые библиотечными компонентами, в большинстве подходов описываются с помощью расширенных конечных автоматов. Произведен обзор подходов, которые могут быть использованы для извлечения стандартных (частых) правил методами статического анализа; восстановлен обобщенный алгоритм, лежащий в их основе; осуществлено сравнение качества результирующих спецификаций. Выявлено, что большая часть методов, основанных на статическом анализе кода, предполагает использование шаблонов для задания множества искомого правил. Часто извлекаемые таким образом правила должны описывать жизненный цикл объектов единственного класса. Показано, что качество конечно-автоматных спецификаций, извлекаемых таким образом, является довольно низким. Продемонстрировано, что для получения более качественного результата необходимо использовать комплексные спецификации, методы извлечения которых малочисленны и на настоящий момент не систематизированы.

**Ключевые слова** – спецификация программной библиотеки, формальная спецификация, извлечение спецификаций, расширенные конечные автоматы, временные свойства, поведенческая модель библиотеки, комплексные правила, статический анализ.

### Введение

В настоящее время практически все программное обеспечение создается с применением разнообразных сторонних библиотек и фреймворков. Разработчик программного обеспечения в начале проектирования должен в первую очередь изучить существующие библиотеки для определения множества имеющихся компонентов, которые он сможет переиспользовать в своем проекте, не реализуя их заново. Основой для принятия решения при этом могут являться документация, предоставляемая авторами, и отзывы других разработчиков. К сожалению, на данный момент распространенной практикой является поставка повторно используемых компонентов “as is”, т. е. с минимальным объемом документации и поясняющих комментариев. Как правило, все ограничивается кратким описанием функций и форматов данных, составляющих интерфейс библиотеки, которое приводится на естественном языке. В некоторых случаях также описываются один или несколько упрощенных примеров ее использования. К наиболее существенным недостаткам подобного подхода относятся неполнота и неоднозначность спецификаций библиотек

[1], что, несомненно, не может не сказываться на времени и качестве разработки. Для преодоления этих ограничений могут быть использованы спецификации библиотек, задаваемые с применением специализированных формальных языков. Помимо документирования, такие спецификации могут быть также использованы для проведения автоматизированной проверки соблюдения программистом правил применения библиотечных компонентов. Соответствующие подходы разрабатываются в лаборатории верификации и анализа программ кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [2, 3].

Успешность применения подходов, базирующихся на спецификациях библиотек, напрямую зависит от наличия и качества таких спецификаций. Ввиду того, что авторы большинства библиотек вряд ли сами будут представлять формальные спецификации, необходимы другие механизмы, которые позволят, хотя бы частично, автоматизировать их создание.

Объектом исследования, представленного в настоящей статье, является опыт применения подходов, относящихся к направлениям Empirical

Software Engineering (эмпирическая программная инженерия) и Mining Software Repositories (извлечение данных из репозитория), для решения задачи восстановления спецификаций программных библиотек путем обобщения пользовательского опыта, накопленного в результате реализации десятков тысяч программных проектов. Использование рассматриваемых подходов предполагает осуществление анализа программных проектов с открытым исходным кодом, в которых задействованы компоненты интересующей библиотеки, с применением методов статического и динамического анализа программного обеспечения. Результатом такого анализа являются полные или частичные модели библиотек, которые могут использоваться как для формирования на их основе формальных спецификаций, так и для документирования указанных библиотек.

Предметом обзора, представленного в статье, являются существующие подходы, которые потенциально могут быть адаптированы для автоматизированного извлечения спецификаций, заданных с использованием формализма, представленного в работе [2]. К отличительным особенностям этого формализма относится то, что он позволяет фиксировать правила применения библиотеки в максимально полном и детализированном виде, а также захватывать правила, характеризующие взаимосвязи, существующие между различными объектами в рамках библиотеки и состоянием самой библиотеки.

Все рассматриваемые в данном обзоре методы опираются на следующие предположения:

- исходный текст искомых библиотек не доступен для анализа;
- известны API (Application Programming Interface) библиотек и используемые типы данных;
- доступно для изучения существенное число программных проектов, лицензия которых не ограничивает доступ к исходному коду и позволяет запускать проект для исследовательских целей.

### Виды формализмов для представления спецификаций

Существует несколько возможных подходов к определению спецификации программной библиотеки, отличающихся по виду данных, фиксируемых с помощью правил, включаемых в ее состав. При этом в большинстве рассматриваемых подходов, за исключением [2], сама библиотека не выделяется в отдельную сущность и ее поведение не описывается явно. Имеющиеся на данный момент модели правил можно классифицировать следующим образом:

1) совместно используемые множества элементов API [4–7];

2) ограничения на значения состояний целевого объекта и параметров вызываемых методов [8–10];

3) временные свойства [11–26];

4) комплексные модели [2, 27–29] (модели подходов CONTRACTOR++, SEKT, TEMI).

С помощью моделей *первой* группы фиксируется необходимость совместного использования элементов API, при этом последовательность обращений не учитывается. Элементами моделей данного вида могут выступать как переменные фиксированного типа [5], так и вызовы методов [4–7]. Необходимо отметить, что на данный момент рассматриваемая группа является единственной, которая поддерживает представление связей реализации и наследования [4, 7].

Правила, сформированные с использованием моделей *второй* группы, позволяют фиксировать аксиоматические предусловия и постусловия методов и инварианты классов. В качестве элементов в них используются переменные, вызовы методов и диапазоны значений для применяемых переменных и возвращаемых результатов [8, 10], осуществляемые проверки значений результатов вызовов взаимно упорядоченных методов и соответствующие вызовы [9]. Искомые отношения между элементами задаются с использованием расширяемых наборов шаблонов и логических операций первого порядка (в частности, формируемые правила могут быть условными [8, 9]).

Формализмы, лежащие в основе правил *третьей* группы, наиболее многочисленны и разнообразны. Они позволяют представлять последовательности вызовов методов, допустимых для совместного использования [13, 14, 16, 18, 22], а также тех, которые необходимо использовать совместно [11, 12, 15, 17, 19–21, 23–26]. При этом в рамках различных моделей методы могут являться как связанными по данным [13, 14, 16, 18, 22–24] или владеющему объекту [14–16], так и независимыми [11, 12, 17, 19–21, 25, 26].

Формализмы, применяемые для фиксации временных свойств, могут быть разделены по виду используемых базовых моделей следующим образом:

1) конечные автоматы (КА) [11–13, 15–20, 23, 25, 26, 30];

2) формулы темпоральной логики [14, 21];

3) отношения в виде частичных порядков [22];

4) модифицированные графы потока управления (Control Flow Graph — CFG) [24].

Для представления предполагаемого алгоритма использования элементов API с помощью моделей *первой* подгруппы используются детерминированные [11–13, 15–20, 23, 25, 26, 30] КА.

В качестве состояний такого автомата могут быть использованы участки исходного кода перед вызовом библиотечных методов внутри метода пользовательской программы [13, 16, 25], сами вызовы методов [19], а также состояния моделируемых абстрактных объектов [18, 20, 23, 26, 30]. Альтернативным решением является хранение «упрощенного» состояния целевого объекта или контекста метода, которые будут зависеть только от вызовов выбранных методов [11, 12, 15, 17].

Специальный вид состояний может быть введен также для фиксации ситуаций, приводящих к возникновению исключений [16]. Для описания последовательности вызовов во всех рассмотренных моделях используются переходы. В значительном числе подходов извлекаемые правила моделируются с использованием шаблонных КА, распознающих алфавит из двух [11, 12, 15, 23] или трех [20, 26] символов. Восстановление более сложных правил возможно путем конструирования составного КА, узлами которого будут являться автоматы элементарных правил, объединяемые последовательно [15, 26] или параллельно [26].

Формализмы *второй* подгруппы позволяют определять порядок выполнения вызовов с помощью формул логики будущего [14] и прошедшего [21] времени, в которых в качестве предикатов выступают соответствующие события. Последний вид формул, помимо определения порядка, позволяет также явным образом задавать асимметричные требования к совместному выполнению вызовов.

Представление правил с применением моделей *третьей* подгруппы [22] позволяет фиксировать временные свойства как иерархическую структуру, узлами которой являются вызовы методов, а связи отображают допустимый порядок между ними.

Правила, сформированные с применением шаблонов *четвертой* подгруппы [24], позволяют фиксировать временные свойства в наиболее развернутом виде (помимо последовательности связанных по данным вызовов, фиксируются управляющие конструкции, используемые совместно с ними, а также то, через какие параметры они связаны).

Наиболее часто встречающимся решением является моделирование временных свойств с использованием формализмов первой подгруппы. Необходимо отметить, что модели, поддерживающие представление временных свойств в виде КА свободной формы, являются более мощными, чем модели с использованием шаблонов и методов композиции. Была показана принципиальная невозможность фиксации некоторых видов правил с применением последних [20], однако в настоящее время ввиду сравнительной простоты

реализации применение таких моделей остается одним из наиболее часто используемых решений.

Существенно менее многочисленны составляющие *четвертую* группу комплексные модели, позволяющие одновременно фиксировать различные виды свойств [2, 27–29], таких как временные свойства и ограничения по данным. Большая часть моделей, принадлежащих к данной группе, основывается на использовании расширенных КА, в которых с помощью меток над переходами могут описываться ограничения, описывающие предполагаемые значения параметров или состояния целевого объекта для подходов [29] (SEKT), [28] (для подхода, предложенного в работе [2], также предлагается описывать влияние на окружение), а также факт подтвержденности перехода для [29] (TEMI). Используемые автоматы могут быть детерминированными [2], [29] (CONTRACTOR++) или недетерминированными [28, 29] (SEKT, TEMI); при этом все рассматриваемые формализмы позволяют захватывать разрешенные последовательности вызовов и соответствующие им ограничения на данные в свободной форме. В работе [27] был предложен специальный вид моделей, основанный на сопоставлении абстрактным переменным, используемым совместно, множеств вызовов, в которых они используются в том или ином качестве, и осуществляемых над ними проверок. Модели такого вида позволяют выявлять стандартные комплексные правила в свободной форме.

Наиболее подробное описание поведения библиотеки среди рассматриваемых формализмов в виде совокупности КА свободной формы позволяет зафиксировать модель, представленную в работе [2]. В рамках рассматриваемого подхода для задания спецификации предлагается использовать иерархию взаимосвязанных расширенных КА. Автомат верхнего уровня используется для представления состояния библиотеки в целом, в то время как автоматы нижележащих уровней, являющиеся дочерними по отношению к нему, применяются для описания стандартных жизненных циклов отдельных объектов. Взаимодействие нескольких объектов в данной модели может быть представлено неявно с использованием КА верхнего уровня. Помимо временных свойств и ограничений на данные, описание методов библиотеки, осуществляемое с применением формализма, должно также содержать информацию о выполняемых ими наборах элементарных семантических операций [3].

Цель исследования, представленного в данной статье, составляет поиск и анализ перспективных статических методов автоматизированного извлечения спецификаций программных библиотек на основе рассмотренного формализма, позволяющих получать наиболее полные и точные результаты.

## Статические методы извлечения спецификаций

Обобщенный алгоритм выявления правил с помощью методов анализа исходного кода [4–7, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 22–25, 27] можно представить в виде последовательности шагов:

- 1) выбор контекста поиска паттернов;
- 2) формирование обобщенных экземпляров контекста поиска;
- 3) кластеризация экземпляров контекста поиска;
- 4) извлечение «транзакций»;
- 5) предварительная обработка «транзакций»;
- 6) поиск правил;
- 7) предоставление результатов пользователю.

В качестве контекста могут использоваться классы [4, 7], методы (преимущественно выбираются именно они [5, 9, 17, 22–25, 27]) и переменные фиксированного библиотечного типа [6, 11, 13, 14, 16]. При выборе контекста уровня классов выделяются свойства, связанные как с использованием механизмов наследования, так и с вызовом методов. При этом в качестве единицы, использующей метод, рассматривается весь класс. Если для осуществления поиска выбран контекст, состоящий из методов «клиентской» программы или переменных фиксированного типа, то предлагаются стратегии формирования «статических трасс». Такие «трассы» генерируются путем реализации различных стратегий обхода графов потока управления (в том числе могут быть учтены цепочки вызовов методов, приводящие к генерации исключений [23]); они содержат информацию о вызываемых библиотечных методах, зависимостях по данным между ними, а также об управляющих структурах.

Сформированные описания могут быть далее уточнены (разбиты на кластеры, составляющие изолированные множества описаний, в которых будет осуществляться поиск) следующим образом:

— совместно вызываемые методы и осуществляемые проверки [27], связанные по данным (формирующие «сценарий» или «модель использования объекта») [6, 11, 13, 14, 16, 22–24, 27];

— методы, используемые при реализации одного и того же абстрактного метода используемого фреймворка [6, 25];

— совокупность обращений к методам API, названия которых отличаются только суффиксами (например, использование пары суффиксов lock/unlock будет говорить о принадлежности к одной и той же латентной спецификации) [17];

— множество осуществляемых до и после вызова конкретного метода API проверок [9].

В сформированной совокупности «транзакций», состоящих из обращений к элементам внеш-

него интерфейса, с применением методов статического анализа осуществляется поиск частых множеств.

Полученный набор фильтруется для снижения ресурсоемкости выполнения следующего шага с применением эвристик, разработанных на основе знания о языке или компоненте. Например, из них могут быть удалены элементы, являющиеся вызовами стандартных функций, таких как *equals()* или *add()*, или цепочки *get*-методов, позволяющие обратиться к конкретному полю сложного объекта [11]. Также предложены метрики «доверия» для различных фрагментов кода, позволяющие рассчитать их «вес» (относительную важность) на основе информации о процессе разработки, извлекаемой из репозитория [23].

После фильтрации осуществляется непосредственно поиск правил использования элементов анализируемой библиотеки. Все используемые методы статического анализа можно разделить по виду применяемых алгоритмов статического анализа на следующие группы:

1) методы поиска частых множеств [4–6, 7, 9, 11, 13, 14, 16, 23, 27];

2) методы поиска частых частичных порядков [22];

3) методы поиска частых последовательностей [17, 25, 27];

4) методы поиска частых изоморфных подграфов [24].

Порог валидности генерируемых правил задается пользователем вручную через указание минимальных значений поддержки (*support*; отношение количества «транзакций», содержащих посылку и следствие, к общему числу «транзакций») и достоверности (*confidence*; отношение количества «транзакций», содержащих посылку и следствие, к количеству «транзакций», содержащих только посылку) или аналогичных параметров.

Основные алгоритмы, используемые для поиска *частых множеств* неупорядоченных элементов, это: «наивный» поиск часто встречающихся наборов обращений к элементам API [6, 9]; классический алгоритм *Apriori* и его модифицированная версия, поддерживающая работу с наследованием [4, 11]; поиск максимальных множеств [5, 7, 27], а также анализ формальных понятий [14]. На их основе были разработаны подходы, позволяющие извлекать КА, распознающие алфавит из фиксированного количества символов, т. е. жестко ограниченное подмножество частых последовательностей. Для достижения данной цели могут быть использованы методы «наивного» подсчета частоты совместного использования пар последовательно идущих вызовов методов [23] или осуществлен переход к «укрупнению»

рассматриваемых элементов транзакций в сочетании с использованием стандартных методов поиска частых множеств неупорядоченных элементов [13, 16]. В последнем случае каждый элемент будет представлять собой упорядоченный набор обращений.

Для поиска *частых частичных порядков* (frequent partial order), описывающих стандартные последовательности вызовов методов API, был предложен алгоритм FRESPO [22]. Его можно рассматривать как модифицированную версию алгоритма Apriori, с помощью которой можно извлекать упорядоченные множества элементов без использования шаблонов.

Методы поиска *частых последовательностей* являются расширением методов группы поиска частых множеств. С их помощью может быть осуществлено извлечение часто встречающихся упорядоченных последовательностей вызовов произвольной длины.

Поиск спецификаций программных библиотек в виде *частых направленных ациклических подграфов* предполагает выявление изоморфных подграфов потоков управления в анализируемых методах клиентских программ [24]. Ключевыми достоинствами такого подхода являются возможность фиксации информации об управляющих конструкциях, часто применяемых совместно с компонентами исследуемой библиотеки, и возможность осуществления непосредственно поиска сложных правил в свободной форме.

Для удобства применения найденные правила или зафиксированные с их применением ошибки при отображении фильтруются и сортируются в соответствии с конкретной решаемой задачей. Так, например, при построении рекомендательной системы используются вероятностные оценки значимости правила [4, 7, 23], а также может быть учтен контекст осуществляемого вызова [25], при выявлении ошибок — вероятность того, что найденный фрагмент кода является ошибочным [5, 11].

В связи с тем, что решаемые задачи являются принципиально разными, сравнить ресурсоемкость подходов и качество получаемых с их применением результатов довольно затруднительно, что отмечается, например, и в обзоре [31]. Часть статей описывает только использование инструментов на уровне пользователя или содержит анализ отдельных результатов [5, 7, 14, 16, 17, 22], часть содержит более подробную информацию об общем количестве найденных истинных и ложных, а также о количестве пропущенных правил [4, 6, 9, 11, 13, 23–25, 27]; некоторые статьи содержат также информацию о времени поиска и используемых аппаратных средствах [5, 13, 14, 16, 27]. Обобщая, несмотря на недостаток систематизированной информации, можно выде-

лить следующие общие свойства существующих решений.

**Большое количество извлекаемых правил.** В обзорах, которые содержат информацию об общем количестве найденных паттернов, отображены результаты от десятков [9, 11, 23, 25] до тысяч, десятков тысяч [4, 5, 16, 27, 24] и миллионов [13] правил. Для использования извлеченных шаблонов конечными пользователями требуется дополнительная автоматизированная постобработка.

**Разные показатели точности получаемых результатов.** Для значительного количества рассмотренных работ, связанных с автоматизированным поиском ошибок на основе извлекаемых правил, оценка рассматриваемых критериев может быть произведена опосредованно на основе информации о количестве ошибочно выявленных правил [9, 27] (так же, как и для систем выявления правил использования компонентов библиотеки [11, 22]) или соотношении истинных и ложных нарушений [5, 9, 13, 14, 16, 17, 24], распознанных с их использованием. В случае же если основной целью разрабатываемого подхода является построение рекомендательной системы [4, 6, 7, 25], для такой оценки могут быть использованы данные о количестве корректно и ошибочно предсказанных вызовов (при этом под ошибочно предсказанными вызовами понимаются вызовы, не соответствующие реально существующим правилам использования компонентов библиотеки [6], а не вызовы, относящиеся к правилам, не востребованным пользователями [25]).

Информация о показателях точности результатов, получаемых с использованием методов статического анализа, представлена в табл. 1 и 2.

Для подходов [4, 7], позволяющих извлекать правила в виде множеств совместно используемых элементов API, информация о качестве результатов не приводится. Для остальных подходов для извлечения правил данного вида точность получаемых результатов варьируется от сравнительно низкого значения 16 % [5] до 98 % [6]. Однако необходимо отметить, что высокая точность искомым правилам, получаемых с помощью метода, представленного в работе [6], обусловливается жестким ограничением на качество исходного кода (ошибка в применении правила согласно введенным ограничениям может заключаться не более чем в наличии или отсутствии вызова только одного метода). Очевидно, что последнее требование является невыполнимым в случае работы с исходным кодом реальных, а не лабораторных проектов.

Единственный среди рассмотренных подходов, основанных на применении методов статического анализа, подход [9], позволяющий получать ограничения на значения состояний целевого объекта и параметры вызываемых методов, напротив,

- **Таблица 1.** Подходы для извлечения совместно используемых элементов API и ограничений на значения состояний целевого объекта и параметры вызываемых методов
- **Table 1.** Approaches to mining of rules containing jointly used library elements and rules containing predicates for allowed target object's states and method parameters

Работа	Элементы моделей	Вид статистических методов	Точность, %
<b>Совместно используемые элементы API</b>			
[4]	Элементы базовых двухэлементных множеств — вызовы методов, наследование от классов и реализация интерфейсов	Поиск частых множеств	–
[5]	Аналогично [4]	То же	16
[6]	Элементы множеств — совместно используемые вызовы	– " –	98
[7]	Аналогично [4]	– " –	–
<b>Ограничения на значения состояний целевого объекта и параметры вызываемых методов</b>			
[9]	Множества проверок, осуществляемых на параметрах и результатах вызова методов, с использованием шаблонов	Поиск частых множеств	67

- **Таблица 2.** Подходы для извлечения временных свойств
- **Table 2.** Approaches to mining of rules containing temporal properties

Работа	Вид временных свойств	Элементы моделей	Точность, %
[11]	КА	Пары вызовов методов, используемых совместно на одном объекте	66
[13]			22
[16]			48
[14]	Формулы STL	Предикаты, описывающие вызовы методов, которые требуется совершить перед вызовом данного	54
[17]	КА	MUST- и MAY-правила осуществления вызовов библиотечных методов, выведенные на основе пользовательских шаблонов, задаваемых для конкретных типов данных	64
[22]	Отношения частичного порядка	Правила, описывающие последовательности вызовов методов без использования шаблонов, могут быть адаптированы для включения вызовов на объектах разных классов	–
[23]	КА	Пары вызовов методов; могут быть адаптированы для включения вызовов на объектах разных классов	95 («точный»), 31 («нормальный»)
[24]	Модифицированный граф потока управления	Последовательности вызовов методов на различных объектах и управляющие конструкции	66

заслуживает внимания. С его помощью можно извлечь информацию о множестве проверок, которые необходимо осуществить до и после вызова библиотечного метода, причем извлекаемые правила формируются с помощью формул булевой

логики. Средняя точность получаемых результатов составляет 67 %. Данный подход может быть адаптирован для восстановления как стандартных ограничений на данные, так и временных свойств.

Однако в рамках сформулированной цели исследования наибольший интерес потенциально представляют показатели качества для методов статического анализа, позволяющих извлекать правила в виде временных свойств (см. табл. 2), а также комплексные правила.

Для подходов [11, 13, 14, 16, 17, 23, 24], предназначенных для извлечения временных свойств, точность получаемых результатов будет варьироваться незначительно, и в среднем будет составлять около 60 %. Необходимо отметить, что для заметного количества подходов [13, 14, 16, 24] при оценке качества учитывались как зафиксированные с использованием полученных правил реальные ошибки, так и «code smells» (потенциально некорректные или неверно оформленные фрагменты кода), для которых не выполняются статистически выявленные правила, но которые при этом не являются ошибочными. Показатели качества для подходов с применением шаблонов и без их использования являются близкими. Наилучших результатов среди всех обозреваемых подходов (95 % извлеченных правил будут являться истинными) позволяет достичь использование подхода, учитывающего при поиске правил значение метрик степени важности того или иного фрагмента используемого кода (в том числе рассчитываемых с использованием артефактов разработки), который был представлен в работе [23], а именно поддерживаемой им стратегии «точного» поиска, при котором осуществляется максимизация данного критерия, в противовес «нормальному поиску», при котором одновременно учитываются и полнота, и точность результата. Платой за выигрыш в точности здесь будет снижение полноты более чем в три раза. Необходимо отметить, что полнота в данном случае оценивалась относительно правил, извлеченных с использованием инструмента WnMiner, что могло повлиять на конечный результат. Кроме снижения полноты, к недостаткам данного подхода относится ограниченность множества правил, которые можно зафиксировать с применением лежащей в его основе модели: несмотря на предоставляемую возможность захвата правил для объектов разных классов, с ее использованием может быть зафиксирована только последовательность длиной в два вызова, что без дополнительной обработки существенно ограничивает множество распознаваемых правил. Для исследований [22, 25] данные, которые могут быть использованы для статистически значимой количественной оценки результатов, не представлены. Среди подходов без использования поисковых шаблонов наилучших показателей качества извлекаемых спецификаций позволяет достичь подход, предложенный в работе [24], который базируется на менее распро-

страненной модели представления правил в виде модифицированного графа потока управления. Для всех подходов, за исключением представленного в работе [25], в которых спецификации фиксируются в виде КА, неотъемлемой чертой является использование шаблонов (подход, рассмотренный в работе [25], позволяет захватывать множество правил, представимых в виде цепочек последовательных вызовов произвольной длины).

Информация о качестве результатов для единственного из обозреваемых подхода [27], который позволяет фиксировать комплексные правила (и при этом делать это без использования шаблонов), приводится на основе анализа одного проекта.

## Заключение

Целью проведенного исследования являлся поиск перспективных методов автоматизированного извлечения спецификаций для формализма описания библиотек, предложенного в работе [2]. В связи с видом выбранной (комплексной) модели наибольший интерес представляют методы, позволяющие восстанавливать временные свойства и комплексные правила, описывающие процесс взаимодействия с библиотечными компонентами.

Рассматриваемые в обзоре методы, основанные на алгоритмах статического анализа, позволяют захватывать только стандартные (частые) последовательности вызовов. Установлено, что точность правил, фиксирующих ограничения на данные в «свободной форме» (без использования шаблонов), будет составлять порядка 70 %. Правила, описывающие временные свойства, которые могут быть извлечены с использованием методов статического анализа, будут обладать средней точностью 60 %. При этом правила, основанные на использовании конечно-автоматного формализма, с помощью методов рассматриваемой группы могут быть восстановлены только с использованием шаблонов. Данные о систематической оценке качества для комплексных правил, извлекаемых с использованием рассматриваемых методов, в проанализированных работах не приводятся.

Продолжение обзора, в котором приводятся результаты исследования подходов к извлечению спецификаций программных библиотек методами динамического анализа, а также осуществляется сравнение подходов различных видов для решения поставленной задачи извлечения комплексных правил, является предметом отдельной статьи.

Работа частично поддержана стипендиальной программой компании «Сименс» в СПбПУ.

## Литература

1. **Uddin G., Robillard M. P.** How API Documentation Fails // *IEEE Software*. 2015. Vol. 32. P. 68–75.
2. **Ицыксон В. М.** Формализм и языковые инструменты для описания семантики программных библиотек // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2016. № 23. С. 754–766.
3. **Ицыксон В. М., Зозуля А. В.** Формализм для описания частичных спецификаций компонентов программного окружения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Секция «Информатика. Телекоммуникации. Управление»*. 2011. № 4(128). С. 81–90.
4. **Michail A.** Data Mining Library Reuse Patterns using Generalized Association Rules // *Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Software Engineering*. 2000. P. 167–176.
5. **Zhou Y., Li Z.** PR-Miner: Automatically Extracting Implicit Programming Rules and Detecting Violations in Large Software Code // *Proc. of the 10th European Software Engineering Conf. Held Jointly with 13th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*. 2005. P. 306–315.
6. **Monperrus M., Bruch M., and Mezini M.** Detecting Missing Method Calls in Object-Oriented Software // *Proc. of the 24th European Conf. on Object-Oriented Programming, ECOOP 2010, Maribor, Slovenia, June 21–25, 2010. Lecture Notes in Computer Science*, 2010. Vol. 6183. P. 2–25.
7. **Bruch M., Schaffer T., Mezini M.** FrUIT: IDE Support for Framework Understanding // *Proc. of the 2006 OOPSLA Workshop on Eclipse Technology eXchange*. 2006. P. 55–59.
8. **Henkel J., Diwan A.** Discovering Algebraic Specifications from Java Classes // *Proc. of the 17th European Conf. on Object-Oriented Programming, ECOOP 2003, Darmstadt, Germany, July 21–25, 2003. Lecture Notes in Computer Science*, 2003. Vol. 2743. P. 431–456.
9. **Thummalapenta S., Xie T.** Alattin: Mining Alternative Patterns for Defect Detection // *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*. 2009. P. 293–323.
10. **Ernst M. D., Perkins J. H., Guo P. J., McCamant S., Pacheco C., Tschantz M. S., Xiao C.** The Daikon System for Dynamic Detection of Likely Invariants // *Science of Computer Programming*. 2007. Vol. 69. Iss. 1–3. P. 35–45.
11. **Livshits B., Zimmerman T.** DynaMine: finding Common Error Patterns by Mining Software Revision Histories // *Proc. of the 10th European Software Engineering Conf. Held Jointly with 13th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*. 2005. P. 296–305.
12. **Gabel M., Su Z.** Online Inference and Enforcement of Temporal Properties // *Proc. of the 32nd ACM/IEEE Intern. Conf. on Software Engineering*. 2010. Vol. 1. P. 15–24.
13. **Gruska N., Wasylkowski A., Zeller A.** Learning from 6,000 Projects: Lightweight Cross-Project Anomaly Detection // *Proc. of the 19th Intern. Symp. on Software Testing and Analysis*. 2010. P. 119–130.
14. **Wasylkowski A., Zeller A.** Mining Temporal Specifications from Object usage // *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*. 2009. P. 295–306.
15. **Yang J., Evans D., Bhardwaj D., Bhat T., Das M.** Peracotta: Mining Temporal API Rules from Imperfect Traces // *Proc. of the 28th Intern. Conf. on Software Engineering*. 2006. P. 282–291.
16. **Wasylkowski A., Zeller A., Lindig C.** Detecting Object usage Anomalies // *Proc. of the 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering*. 2007. P. 35–44.
17. **Engler D., Chen D. Y., Hallem S., Chou A., Chelf B.** Bugs as Deviant Behavior // *Proc. of the 18th ACM Symp. on Operating Systems Principles*. 2001. P. 57–72.
18. **Ammons G., Bodik R., Larus J. R.** Mining Specifications // *Proc. of the 29th ACM SIGPLAN-SIGACT Symp. on Principles of Programming Languages*. 2002. P. 4–16.
19. **Pradel M., Gross T. L.** Automatic Generation of Object usage Specifications from Large Method Traces // *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*. 2009. P. 371–382.
20. **Gabel M., Su Z.** Symbolic Mining of Temporal Specifications // *Proc. of the 30th Intern. Conf. on Software Engineering*. 2008. P. 51–60.
21. **Lo D., Khoo S., Liu C.** Mining Past-Time Temporal Rules from Execution Traces // *Proc. of the 2008 Intern. Workshop on Dynamic Analysis: Held in Conjunction with the ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Software Testing and Analysis (ISSTA 2008)*. 2008. P. 50–56.
22. **Acharya M., Xie T., Pei J., Xu J.** Mining API Patterns as Partial Orders from Source Code: From usage Scenarios to Specifications // *Proc. of the 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering*. 2007. P. 25–34.
23. **Goues C., Weimer W.** Specification Mining with Few False Positives // *Proc. of the 15th Intern. Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems: Held as Part of the Joint European Conf. on Theory and Practice of Software*. 2009. P. 292–306.
24. **Nguyen T. T., Nguyen H. A., Pham N. H., Al-Kofahi J. M., Nguyen T. N.** Graph-based Mining of Multiple Object usage Patterns // *Proc. of the 7th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering*. 2009. P. 383–392.
25. **Zhong H., Xie T., Zhang L., Pei J., Mei H.** MAPO: Mining and Recommending API usage Patterns // *Proc. of the 23rd European Conf. on Object-Oriented Programming, ECOOP 2009, Genoa, Italy, July 6–10, 2009*.

- Lecture Notes in Computer Science, 2009. Vol. 5653. P. 318–343.
26. Gabel M., Su Z. Javert: Fully Automatic Mining of General Temporal Properties from Dynamic Traces // Proc. of the 16th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering, 2008. P. 339–349.
  27. Ramanathan M., Grama A., Jaganathan S. Static Inference with Predicate Mining // Proc. of the 28th ACM SIGPLAN Conf. on Programming Language Design and Implementation, 2007. P. 123–134.
  28. Lorenzoli D., Mariani L., Pezze M. Automatic Generation of Software Behavioral Models // Proc. of the 30th Intern. Conf. on Software Engineering, 2008. P. 501–510.
  29. Krka I., Medvidovic N., Brun Y. Automatic Mining of Specifications from Invocation Traces and Method Invariants // Proc. of the 22nd ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering, 2014. P. 178–189.
  30. Alur R., Cerny P., Madhusudan P., Nam W. Synthesis of Interface Specifications for Java Classes // Proc. of the 32nd ACM SIGPLAN-SIGACT Symp. on Principles of Programming Languages, 2005. P. 98–109.
  31. Robillard M. P., Bodden E., Kawrykow D., Mezini M., Ratchford T. Automated API Property Inference Techniques // IEEE Transactions on Software Engineering, 2013. Vol. 39. Iss. 5. P. 613–637.

UDC 004.4'2

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.66

## Survey of Static Methods for Partial Software Library Specifications Extraction

Egorova I. S.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, is.egorova@mail.ruItsykson V. M.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, vlad@icc.spbstu.ru<sup>a</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Wide usage of third-party software libraries and frameworks for software development along with the lack of their precise documentation actualize the problem of creating formal software library specifications. Recovery of such specifications could be performed with the application of successfully developed open-source projects. **Purpose:** Analysis and classification of prospective approaches to automated extraction of the most expressive complex software library specifications based on the methods of static code analysis. **Results:** Various approaches used to describe library components have been reviewed and compared. We have discussed the ways of deriving standard (frequent) specifications using static analysis methods, and recovered the common algorithm they share. It is found out that most methods based on static analysis of the code presume the usage of templates to define a set of rules. Specifications frequently recovered in this way should only describe a lifecycle for objects of a single class. The quality of the resulting specifications is usually quite low so far. To obtain better results, complex specifications should be used whose recovery methods are currently few in numbers and not systematized.

**Keywords** — Software Library Specification, Formal Specification, Specification Extraction, Extended Finite State Machine, Temporal Properties, Behavioral Software Library Model, Complex Rules, Static Analysis.

## References

1. Uddin G., Robillard M. P. How API Documentation Fails. *IEEE Software*, 2015, vol. 32, pp. 68–75.
2. Itsykson V. M. The Formalism and Language Tools for Semantics Specification of Software Libraries. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem* [Modeling and Analysis of Information Systems], 2016, no. 23, pp. 754–766 (In Russian).
3. Itsykson V. M., Zozulya A. V. Formalism for Description of Software Components Partial Descriptions. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Sektsiya "Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie"* [Scientific Journal of SPBSPU. Section "Computer Science. Telecommunication. Control"], 2011, no. 4(123), pp. 81–90 (In Russian).
4. Michail A. Data Mining Library Reuse Patterns using Generalized Association Rules. *Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Software Engineering*, 2000, pp. 167–176.
5. Zhou Y., Li Z. PR-Miner: Automatically Extracting Implicit Programming Rules and Detecting Violations in Large Software Code. *Proc. of the 10th European Software Engineering Conf. Held Jointly with 13th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*, 2005, pp. 306–315.
6. Monperrus M., Bruch M., and Mezini M. Detecting Missing Method Calls in Object-Oriented Software. *Proc. of the 24th European Conf. on Object-Oriented Programming, ECOOP 2010, Maribor, Slovenia, June 21–25, 2010*. Lecture Notes in Computer Science, 2010, vol. 6183, pp. 2–25.
7. Bruch M., Schaffer T., Mezini M. FrUIT: IDE Support for Framework Understanding. *Proc. of the 2006 OOPSLA Workshop on Eclipse Technology eXchange*, 2006, pp. 55–59.
8. Henkel J., Diwan A. Discovering Algebraic Specifications from Java Classes. *Proc. of the 17th European Conf. on Object-Oriented Programming, ECOOP 2003, Darmstadt, Germany, July 21–25, 2003*. Lecture Notes in Computer Science, 2003, vol. 2743, pp. 431–456.
9. Thummalapenta S., Xie T. Alattin: Mining Alternative Patterns for Defect Detection. *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*, 2009, pp. 293–323.
10. Ernst M. D., Perkins J. H., Guo P. J., McCamant S., Pacheco C., Tschantz M. S., Xiao C. The Daikon System for Dynamic Detection of Likely Invariants. *Science of Computer Programming*, 2007, vol. 69, iss. 1–3, pp. 35–45.
11. Livshits B., Zimmerman T. DynaMine: finding Common Error Patterns by Mining Software Revision Histories. *Proc. of the 10th European Software Engineering Conf. Held Jointly with 13th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*, 2005, pp. 296–305.
12. Gabel M., Su Z. Online Inference and Enforcement of Temporal Properties. *Proc. of the 32nd ACM/IEEE Intern. Conf. on Software Engineering*, 2010, vol. 1, pp. 15–24.
13. Gruska N., Wasylkowski A., Zeller A. Learning from 6,000 Projects: Lightweight Cross-Project Anomaly Detection. *Proc. of the 19th Intern. Symp. on Software Testing and Analysis*, 2010, pp. 119–130.
14. Wasylkowski A., Zeller A. Mining Temporal Specifications from Object usage. *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*, 2009, pp. 295–306.
15. Yang J., Evans D., Bhardwaj D., Bhat T., Das M. Perracotta: Mining Temporal API Rules from Imperfect Traces. *Proc.*

- of the 28th Intern. Conf. on Software Engineering, 2006, pp. 282–291.
16. Wasylkowski A., Zeller A., Lindig C. Detecting Object usage Anomalies. *Proc. of the 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering*, 2007, pp. 35–44.
  17. Engler D., Chen D. Y., Hallem S., Chou A., Chelf B. Bugs as Deviant Behavior. *Proc. of the 18th ACM Symp. on Operating Systems Principles*, 2001, pp. 57–72.
  18. Ammons G., Bodik R., Larus J. R. Mining Specifications. *Proc. of the 29th ACM SIGPLAN-SIGACT Symp. on Principles of Programming Languages*, 2002, pp. 4–16.
  19. Pradel M., Gross T. L. Automatic Generation of Object usage Specifications from Large Method Traces. *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*, 2009, pp. 371–382.
  20. Gabel M., Su Z. Symbolic Mining of Temporal Specifications. *Proc. of the 30th Intern. Conf. on Software Engineering*, 2008, pp. 51–60.
  21. Lo D., Khoo S., Liu C. Mining Past-Time Temporal Rules from Execution Traces. *Proc. of the 2008 Intern. Workshop on Dynamic Analysis: Held in Conjunction with the ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Software Testing and Analysis (ISSTA 2008)*, 2008, pp. 50–56.
  22. Acharya M., Xie T., Pei J., Xu J. Mining API Patterns as Partial Orders from Source Code: From usage Scenarios to Specifications. *Proc. of the 6th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering*, 2007, pp. 25–34.
  23. Goues C., Weimer W. Specification Mining with Few False Positives. *Proc. of the 15th Intern. Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems: Held as Part of the Joint European Conf. on Theory and Practice of Software*, 2009, pp. 292–306.
  24. Nguyen T. T., Nguyen H. A., Pham N. H., Al-Kofahi J. M., Nguyen T. N. Graph-based Mining of Multiple Object usage Patterns. *Proc. of the 7th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering*, 2009, pp. 383–392.
  25. Zhong H., Xie T., Zhang L., Pei J., Mei H. MAPO: Mining and Recommending API usage Patterns. *Proc. of the 23rd European Conf. on Object-Oriented Programming, ECOOP 2009, Genoa, Italy, July 6–10, 2009. Lecture Notes in Computer Science*, 2009, vol. 5653, pp. 318–343.
  26. Gabel M., Su Z. Javert: Fully Automatic Mining of General Temporal Properties from Dynamic Traces. *Proc. of the 16th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*, 2008, pp. 339–349.
  27. Ramanathan M., Grama A., Jaganathan S. Static Inference with Predicate Mining. *Proc. of the 28th ACM SIGPLAN Conf. on Programming Language Design and Implementation*, 2007, pp. 123–134.
  28. Lorenzoli D., Mariani L., Pezze M. Automatic Generation of Software Behavioral Models. *Proc. of the 30th Intern. Conf. on Software Engineering*, 2008, pp. 501–510.
  29. Krka I., Medvidovic N., Brun Y. Automatic Mining of Specifications from Invocation Traces and Method Invariants. *Proc. of the 22nd ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*, 2014, pp. 178–189.
  30. Alur R., Cerny P., Madhusudan P., Nam W. Synthesis of Interface Specifications for Java Classes. *Proc. of the 32nd ACM SIGPLAN-SIGACT Symp. on Principles of Programming Languages*, 2005, pp. 98–109.
  31. Robillard M. P., Bodden E., Kawrykow D., Mezini M., Ratchford T. Automated API Property Inference Techniques. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2013, vol. 39, iss. 5, pp. 613–637.

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

## ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТРИК CVSS

**Е. В. Дойникова<sup>а, б</sup>**, канд. техн. наук, научный сотрудник

**А. А. Чечулин<sup>а, б</sup>**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

**И. В. Котенко<sup>а, б</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** в современных условиях чрезвычайно актуальной является проблема улучшения качества оценки защищенности компьютерных сетей для автоматизированных систем защиты, целью которых является проактивная защита от атак, за счет применения объективных количественных показателей защищенности, вычисляемых с использованием метрик открытой системы оценки защищенности CVSS (Common Vulnerability Scoring System) и аналитических моделей. **Цель исследования:** совершенствование разработанного ранее подхода к оценке защищенности на основе аналитического моделирования, применения открытых стандартов представления данных безопасности и метрик CVSS благодаря новой версии CVSS. В основе подхода лежит графовая модель действий злоумышленника, формируемая с использованием метрик CVSS. Неточности предыдущей версии формата CVSS привели к некоторым допущениям при автоматической генерации графа действий злоумышленника. Предполагается, что применение метрик новой версии позволит усовершенствовать процедуру генерации графа и оценки защищенности на его основе. **Результаты:** исследования показали, что результаты оценки защищенности существенно зависят от корректности входных данных. Для получения исходных оценок уязвимостей применена система CVSS (метрики для оценки уязвимостей, их описание и критерии назначения оценок) и открытые базы уязвимостей. Выявлены недостатки описания метрик CVSS версии 2 и отличия CVSS версии 3, а именно: введены новые качественные значения метрик для учета существенных для безопасности характеристик, которые ранее игнорировались; определены области возможных значений метрик, снимающие существовавшую ранее неопределенность. Разработан новый подход к моделированию атак и анализу защищенности компьютерных сетей на основе формата CVSS версии 3, описаны его преимущества по сравнению с предложенным авторами ранее подходом, заключающиеся в устранении допущений при формировании графа действий злоумышленника, связанных с определением предусловий и постусловий атакующих действий. Приведены примеры применения метрик CVSS версии 3 для оценки защищенности компьютерных сетей на основе использования методов аналитического моделирования. **Практическая значимость:** новизна и практическая значимость предложенного подхода заключаются в совершенствовании процедур генерации графа атак и анализа защищенности компьютерных сетей на основе использования нового формата оценки уязвимостей CVSS версии 3 в рамках программной системы оценки защищенности компьютерных сетей.

**Ключевые слова** — аналитическое моделирование, оценка защищенности, показатели защищенности, Common Vulnerability Scoring System, защита от атак, компьютерные сети, графы атак, деревья атак.

### Введение

В современных условиях, когда деятельность все большего количества организаций зависит от защищенного и надежного функционирования компьютерных сетей, проблема мониторинга безопасности компьютерных сетей является особенно важной и актуальной.

Злоумышленники для достижения своих целей зачастую реализуют сложные многошаговые атаки, которые включают последовательность шагов, основанных на эксплуатации различных уязвимостей, ошибок конфигурации и особенностей реализации программно-аппаратного обеспечения. Своевременное обнаружение атакующего в системе и точное прогнозирование его целей может помочь предотвратить серьезный урон системе и избежать больших потерь. Для этих целей исследователями разрабатывались подходы на основе аналитического моделирования.

Было предложено большое количество методов моделирования шагов атакующего в системе, в том числе в виде графов атакующих действий.

Вопросы формирования графов атак и анализа защищенности на их основе рассматриваются во множестве работ [1–12].

Выделяется несколько типов графов атак: полный граф атак [1] включает все пути, которыми атакующий может скомпрометировать сеть; в предиктивном графе [2] узел добавляется в граф в том случае, если ни один предок данного узла не использует ту же уязвимость для перехода в то же состояние, что и новый узел; граф с множеством предусловий [3] включает три типа узлов: состояние, предусловия, уязвимость — и дополнительные циклические дуги для отображения связей с уже существующими узлами.

В ряде работ рассматривается проблема оперативности построения графов атак [3, 4, 16].

На основе графов атак был разработан ряд вероятностных моделей для анализа защищенности системы. В работах [4–7] предлагается использовать вероятностные графы атак, а байесовские графы атак применяются в работах [8–12].

В предыдущих работах авторов были представлены разные варианты алгоритмов построе-

ния и анализа деревьев атак [13, 14], являющихся подклассом графов атак, а также метрики, рассчитываемые на основе деревьев атак [15], и модификация алгоритмов построения деревьев атак для генерации и анализа моделей в режиме, близком к реальному времени [16].

Важной особенностью авторского подхода является применение открытых баз, что, с одной стороны, позволяет учитывать максимальное количество известных уязвимостей, а с другой — автоматизировать процесс. Другой важной особенностью предложенного ранее подхода является оперативность построения графа, что критически важно в динамическом режиме работы системы, когда от своевременности реагирования на атаку зависит уровень итоговых потерь.

В основе предложенного подхода лежит Common Vulnerability Scoring System (CVSS) [17]. Ключевыми факторами, благодаря которым данный формат был выбран, является открытость CVSS-оценок, что позволяет использовать их для формирования собственных показателей защищенности, и наличие связей между CVSS и стандартами Common Platform Enumeration (CPE) [18] и Common Configuration Enumeration (CCE) [19], что позволяет автоматизировать идентификацию и оценку уязвимостей.

Предыдущий формат имел ряд неточностей, которые привели к некоторым допущениям при автоматической генерации графа атакующих действий. В 2015 г. вышла новая версия CVSS, которая учитывает проблемы предыдущей версии.

В статье рассматривается новый формат, анализируются его достоинства и его влияние на подход, предложенный авторами ранее. На основе проведенного анализа предлагаются изменения в процедуре генерации графа и оценки защищенности и рассматриваются преимущества и недостатки нового метода на примере.

## Применение CVSS для формирования графов атак

### CVSS версии 2.0

CVSS включает ряд метрик, характеризующих уязвимости программного и аппаратного обеспечения и позволяющих получить итоговую интегральную оценку уязвимости, характеризующую ее критичность по сравнению с другими уязвимостями [20]. CVSS включает три группы метрик: основные, временные и контекстные. На данный момент для построения графа используются только основные метрики, поэтому ниже приведено их краткое описание. Значения метрик для известных уязвимостей можно найти в открытой базе уязвимостей NVD [21].

В группу базовых метрик CVSS версии 2.0 входят две группы: *Exploitability* (эксплуати-

руемость) и *Impact* (ущерб). Метрики группы *Exploitability* определяют способ доступа к уязвимости и необходимость дополнительных условий для ее эксплуатации. Метрики группы *Impact* измеряют влияние уязвимости на актив информационных технологий в случае эксплуатации.

Рассмотрим эти метрики и соответствующие неточности в задании их значений.

К метрикам группы *Exploitability* относятся: *Access Vector* (вектор доступа), *Access Complexity* (сложность доступа) и *Authentication* (аутентификация). *Access Vector* определяет, как эксплуатируется уязвимость (чем более удаленный нарушитель может атаковать хост, тем выше оценка уязвимости). Если уязвимость может быть использована несколькими способами, то выбирается наиболее удаленный доступ. При формировании графа данный показатель используется для определения предусловий эксплуатации уязвимостей, что позволяет сформировать последовательные связи между ними для объединения отдельных шагов в многошаговую атаку. *Неточность 1* состоит в том, что значение показателя «локальный доступ» не определяет, какой именно подразумевается тип доступа — физический или логический. *Access Complexity* задает сложность атаки, которую необходимо провести для эксплуатации уязвимости, после того, как нарушитель получил доступ к системе. Чем ниже сложность, тем выше оценка уязвимости. Данная метрика позволяет определить, насколько вероятна успешная эксплуатация уязвимости. *Неточность 2* состоит в том, что при этом не выделяются отдельно уязвимости, требующие дополнительных действий от пользователя. *Authentication* определяет, сколько раз атакующий должен аутентифицироваться в системе, чтобы использовать уязвимость (сложность процесса не учитывается, только количество). Чем меньше количество процедур аутентификации, тем выше оценка. Данная метрика отличается от метрики *Access Vector*, т. е. считается, что доступ к системе уже есть (кроме логина нужно предоставить еще дополнительную аутентификацию). *Неточность 3* состоит в том, что метрика не определяет, какой именно уровень привилегий требуется при дополнительной аутентификации.

К метрикам группы *Impact* относятся: *Confidentiality Impact* (влияние на конфиденциальность), *Integrity Impact* (влияние на целостность) и *Availability Impact* (влияние на доступность). *Confidentiality Impact* определяет ущерб конфиденциальности в результате успешной эксплуатации уязвимости. *Integrity Impact* задает ущерб целостности после успешной эксплуатации уязвимости. *Availability Impact* определяет ущерб доступности в результате успешной эксплуатации уязвимости. Увеличение ущерба для

любого из трех свойств безопасности увеличивает оценку уязвимости. При этом *неточность 4* состоит в том, что данные метрики не учитывают область действия уязвимости.

### CVSS версии 3.0

Важным требованием к CVSS является то, что определение характеристик уязвимостей должно быть понятным для любого эксперта и однозначным. Ряд неточностей, возникающих при применении формата версии 2.0, был устранен в новой версии.

CVSS версии 3.0 [22], как и предыдущая версия, включает две группы метрик: *Exploitability* и *Impact*. Метрики группы *Exploitability* отображают характеристики уязвимого компонента. К ним относятся: *Attack Vector* (вектор атаки), *Attack Complexity* (сложность атаки), *Privileges Required* (требуемые привилегии), *User Interaction* (взаимодействие с пользователем). Метрики группы *Impact* отображают последствия атаки на уязвимый компонент. К ним относятся: *Confidentiality Impact* (влияние на конфиденциальность), *Integrity Impact* (влияние на целостность), *Availability Impact* (влияние на доступность).

Самым важным отличием нового формата является то, что была дополнительно добавлена метрика *Scope* (область действия). Данная метрика позволяет отделить уязвимый компонент (компонент, содержащий уязвимость, например, программное обеспечение, модуль, драйвер и др.)

от компонента, которому наносится ущерб (программное обеспечение, аппаратное обеспечение или сетевой ресурс).

Группа метрик *Impact* не изменилась по сравнению с предыдущей версией (тем не менее влияние теперь определяется по области действия *Scope* с учетом максимального воздействия). В группе метрик *Exploitability* метрика *Authentication* заменена на *Privileges Required* и добавлена метрика *User Interaction* (взаимодействие с пользователем раньше учитывалось при определении оценки метрики *Access Complexity*).

Детальное сравнение метрик CVSS версий 2.0 и 3.0 приведено в табл. 1. Сравнение показало, что все метрики были изменены в той или иной степени. В табл. 1 отдельно выделены серым цветом сильно измененные метрики/значения (например, вновь добавленные или удаленные). Остальные метрики подверглись небольшим изменениям (например, численных значений). Рассмотрим эти изменения подробнее.

Важность метрики *Scope* объясняется тем, что в CVSS версии 2.0 не была явно определена область действия ущерба, наносимого уязвимостью. Метрика *Scope* решает эту проблему, четко ограничивая область влияния и устраняя таким образом *неточность 4*. *Scope* относится к набору привилегий, определяемому при назначении доступа ресурсам (файлам, ЦПУ, памяти и т. п.). Когда уязвимость компонента программного обеспечения, управляемая одной областью полномочий, может влиять на ресурсы, управляемые другой областью

■ **Таблица 1.** Сравнение метрик CVSS версий 2.0 и 3.0

■ **Table 1.** Comparison of the metrics of CVSS of version 2.0 and CVSS of version 3.0

CVSS версии 2.0	CVSS версии 3.0
<b>Группа <i>Exploitability</i></b>	
<i>Access Vector (AV)</i>	<i>Attack Vector (AV)</i>
Значения <i>AV</i>	Значения <i>AV</i>
Local (L): 0.395 — для эксплуатации уязвимости требуется локальный доступ к хосту	Local (L): 0.55 — атакующему необходимы права чтение/запись/запуск, чтобы эксплуатировать уязвимость. То есть атакующий должен либо быть залогинен в системе, либо положиться на взаимодействие с пользователем
	Physical (P): 0.2 — требует физических манипуляций с уязвимым компонентом
Adjacent Network (A): 0.646 — для эксплуатации уязвимости требуется доступ к смежной сети	Adjacent (A): 0.62 — для эксплуатации уязвимости требуется доступ к смежной сети
Network (N): 1.0 — для эксплуатации уязвимости требуется сетевой доступ	Network (N): 0.85 — для эксплуатации уязвимости требуется сетевой доступ
<i>Access Complexity (AC)</i>	<i>Attack Complexity (AC)</i>
Значения <i>AC</i>	Значения <i>AC</i>
High (H): 0.35 — высокая сложность эксплуатации уязвимости	High: 0.44 — успех атаки зависит от условий вне контроля атакующего
Medium (M): 0.61 — средняя сложность эксплуатации уязвимости	

■ Окончание табл. 1

■ Table 1.

CVSS версии 2.0	CVSS версии 3.0
Low (L): 0.71 — низкая сложность эксплуатации уязвимости	Low: 0.77 — нет особых условий доступа. Атакующий может ожидать повторяемого успеха против уязвимого компонента
<i>Authentication (Au)</i>	<i>Privileges Required (PR)</i>
Значения <i>Au</i>	Значения <i>PR</i>
Multiple (M): 0.45 — для эксплуатации уязвимости требуется дополнительно пройти множество процедур аутентификации	High: 0.27 (0.5, если изменилось значение <i>Scope</i> ) — атакующий авторизован и имеет привилегии, дающие значительный (административный) доступ к уязвимому компоненту, что может повлиять на настройки и файлы всей системы
Single (S): 0.56 — для эксплуатации уязвимости требуется дополнительно пройти одну процедуру аутентификации	Low: 0.62 (0.68, если изменилось значение <i>Scope</i> ) — атакующий авторизован и имеет привилегии, дающие базовые пользовательские возможности, которые влияют только на файлы и настройки данного пользователя или только на неконфиденциальные ресурсы
None (N): 0.704 — для эксплуатации уязвимости дополнительной аутентификации не требуется	None: 0.85 — атакующий не авторизован, т. е. доступа к настройкам и файлам не требуется
—	<i>User Interaction (UI)</i>
	Значения <i>UI</i>
	None: 0.85 — система может быть скомпрометирована без участия пользователя Required: 0.62 — пользователь должен совершить какие-то действия до того, как уязвимость будет проэксплуатирована. Например, успешный эксплоит возможен только в случае установки приложения системным администратором
<b>Группа Impact</b>	
<i>Confidentiality Impact (C)</i>	<i>Confidentiality Impact (C)</i>
Значения <i>C</i>	Значения <i>C</i>
None (N): 0.0 — нет ущерба	None (N): 0
Partial (P): 0.275 — частичный ущерб	Low (L): 0.22
Complete (C): 0.660 — полный ущерб	High (H): 0.56
<i>Integrity Impact (I)</i>	<i>Integrity Impact (I)</i>
Значения <i>I</i>	Значения <i>I</i>
None (N): 0.0	None (N): 0
Partial (P): 0.275	Low (L): 0.22
Complete (C): 0.660	High (H): 0.56
<i>Availability Impact (A)</i>	<i>Availability Impact (A)</i>
Значения <i>A</i>	Значения <i>A</i>
None (N): 0.0	None (N): 0
Partial (P): 0.275	Low (L): 0.22
Complete (C): 0.660	High (H): 0.56
—	<i>Scope (S)</i>
	Значения <i>S</i>
	Unchanged (U) — уязвимость влияет только на ресурсы в рамках привилегий уязвимого компонента: уязвимый компонент и подверженный влиянию компонент — один и тот же Changed (C) — уязвимость влияет на ресурсы вне привилегий уязвимого компонента, в этом случае уязвимый компонент и подверженный влиянию компонент — разные

■ **Таблица 2.** Формулы CVSS в версии 2.0 и версии 3.0  
 ■ **Table 2.** The equations of CVSS of version 2.0 and CVSS of version 3.0

CVSS версии 2.0	CVSS версии 3.0
$CVSS\_Score = \text{round\_to\_1\_decimal}(((0.6 \times Impact) + (0.4 \times Exploitability) - 1.5) \times f(Impact))$	Если ( $Impact \leq 0$ ) $CVSS\_Score = 0$ , иначе если ( $Scope = Unchanged$ ) $CVSS\_Score = \text{Roundup}(\min[Impact + Exploitability], 10]$ , иначе если ( $Scope = Changed$ ) $CVSS\_Score = \text{Roundup}(\min[1.08 \times (Impact + Exploitability), 10])$
$Impact = 10.41 \times (1 - (1 - C) \times (1 - I) \times (1 - A))$	Если ( $Scope = Unchanged$ ) $Impact = 6.42 \times ISC_{Base}$ , иначе если ( $Scope = Changed$ ) $Impact = 7.52 \times (ISC_{Base} - 0.029) - 3.25 \times (ISC_{Base} - 0.02)^{15}$ $ISC_{Base} = 1 - [(1 - C) \times (1 - I) \times (1 - A)]$
$Exploitability = 20 \times AV \times AC \times Au$	$8.22 \times AV \times AC \times PR \times UI$
Если ( $Impact = 0$ ) $f(Impact) = 0$ , иначе $f(Impact) = 1.176$	-
round_to_1_decimal — функция округления до одного десятичного знака после запятой в большую сторону	Roundup — округление до одного десятичного знака после запятой в большую сторону

полномочий, происходит смена *Scope*. В качестве примера здесь можно привести уязвимость виртуальной машины, которая позволяет атакователю удалять файлы на хостовой операционной системе, возможно, даже саму виртуальную машину. Базовая оценка растет в случае смены *Scope*.

Метрика *Attack Vector* сохранилась из предыдущей версии, но изменились ее возможные значения. В CVSS версии 3.0 физический доступ выделен в отдельное значение, что устраняет *неточность 1* (путаницу между локальным и физическим доступом). Значение метрики тем больше, чем более удаленный (логически и физически) атакующий может ее использовать (удаленных атакующих намного больше, чем тех, у кого есть физический доступ к устройству).

Метрика *Attack Complexity* унаследована из CVSS версии 2.0 от метрики *Access Complexity*. Однако она больше не учитывает взаимодействие с пользователем и изменились ее значения (см. табл. 1).

Заменившая метрику *Authentication* метрика *Privileges Required* определяет уровень привилегий, необходимый атакующему до того, как уязвимость будет успешно проэксплуатирована. Значение данной метрики выше всего, если не требуется никаких привилегий. Она снимает *неточность 3*, позволяя связать условия эксплуатации уязвимости на одном хосте с условиями на другом.

Новая метрика *User Interaction* определяет требования к пользователю, отличному от атакующего, необходимые для успешной компрометации уязвимого компонента. Метрика определяет, может ли уязвимость эксплуатироваться без участия атакуемого пользователя. Например, для успешного проведения атаки может потребоваться,

чтобы жертва открыла в браузере сформированную атакующим вредоносную ссылку. Метрика имеет наибольшее значение, когда не требуется взаимодействие с пользователем. Введение данной метрики устраняет *неточность 2*.

Описанные метрики используются для вычисления общей оценки CVSS для уязвимостей. Для этой цели в формате CVSS приведены специальные формулы. В связи с изменениями метрик CVSS и их значений формулы в CVSS 3.0 были также изменены. Формулы CVSS версии 2.0 и версии 3.0 приведены в табл. 2 для сравнения (обозначения метрик взяты из табл. 1).

Таким образом, изменения, внесенные в CVSS версии 3.0, снимают многие проблемы, возникавшие ранее. В следующем разделе рассматривается влияние данных изменений на процесс построения и анализа графа атак.

## Графы атак

### Формирование графов атак на основе формата CVSS версии 2.0

Общий алгоритм построения графов атак состоит из трех шагов:

- 1) формирование матриц по базам уязвимостей и конфигурации программно-аппаратного обеспечения хостов;
- 2) формирование списков доступных нарушителям атакующих действий;
- 3) генерация графа атак на основе графа связей сети и списков атакующих действий.

Рассмотрим данные шаги более подробно.

**Шаг 1.** Для построения графов атак формируется список возможных атакующих действий, разбитых на группы в соответствии с метриками

CVSS версии 2.0. Для этого для каждого хоста из сети строится трехмерная матрица по следующим данным:

1) класс атак (сбор данных, подготовительные действия, повышение привилегий, выполнение цели атаки) — определяется на основе используемых баз (база атак CAPEC [23] или база уязвимостей CVE) с учетом влияния на конфиденциальность (*Confidentiality Impact*), целостность (*Integrity Impact*), доступность (*Availability Impact*) и получаемых прав (*Gained Access Level*);

2) тип доступа (удаленный источник без прав доступа, удаленный пользователь системы, локальный пользователь системы, администратор) — определяется на основе вектора доступа (*Access Vector*) и аутентификации (*Authentication*);

3) уровень знаний нарушителя (типы уязвимостей, которые нарушитель сможет реализовать) — определяется на основе сложности доступа (*Access Complexity*).

При этом ячейки матрицы (т. е. пересечения класса атаки, типа доступа и уровня знаний нарушителя) являются списками уязвимостей, соответствующих этим параметрам. После формирования самой матрицы ее ячейки заполняются конкретными атакующими действиями на основе списков существующих уязвимостей, соответствующих конфигурации программно-аппаратного обеспечения хоста, и атак, направленных на сбор информации. Списки возможных атак ограничиваются параметрами безопасности хоста (т. е. ограничениями на список возможных уязвимостей и атак, направленных на сбор информации). В результате для каждого хоста формируется список возможных атакующих действий, разбитых на группы по следующим параметрам: класс атаки, необходимый тип доступа и необходимый уровень знаний нарушителя. Для каждой группы в свою очередь формируется список конкретных атак и уязвимостей, которые эти атаки реализуют. Например, уязвимость CVE-2016-10108 позволяет получить права администратора (*Gained Access Level* = “administrator”) на некоторых версиях Western Digital MyCloud NAS. Эта уязвимость (или атакующее действие, реализующее данную уязвимость) относится к классам атак «повышение привилегий» и «выполнение цели атаки», может быть проэксплуатирована удаленно (*Access Vector* = “Network”) и не требует предварительного получения прав доступа (*Authentication* = “None”) и знаний нарушителя (*Access Complexity* = “Low”). Таким образом, данная уязвимость относится к группе «повышение привилегий» (класс атаки): удаленный источник без прав доступа (тип доступа), не требуется специализированных знаний (уровень знаний нарушителя).

Кроме отдельных уязвимостей при построении графа атак используются шаблоны атак в фор-

мате CAPEC, которые могут выступать не только в качестве входной информации для построения графов атак, но и как результат анализа безопасности — они могут описывать наиболее часто встретившиеся последовательности эксплуатаций уязвимостей и других действий атакующего. Также шаблоны содержат описания атак, которые не используют уязвимости, например, первая стадия проведения атаки — это сбор информации о доступных хостах. Для этого применяется шаблон CAPEC-292 (Host Discovery), описывающий группу различных способов проведения сканирования хостов и портов. Следующая стадия атаки — поиск уязвимого программного обеспечения. Для этого используются следующие шаблоны: CAPEC-310 (Scanning for Vulnerable Software), CAPEC-311 (Fingerprinting Remote Operating Systems), CAPEC-300 (Port Scanning) и т. д. На третьей стадии проведения атаки используются как отдельные уязвимости из словаря CVE, так и шаблоны, например CAPEC-233 (Privilege Escalation) и т. д.

Метрики CVSS *Access Vector*, *Authentication* и *Access Complexity* являются предусловиями эксплуатации уязвимостей, т. е. предусловиями, необходимыми для успешной реализации атаки, и помимо формирования графа применяются при оценке защищенности компьютерной сети для определения вероятности успешной реализации атаки [23, 24]. Метрики *Confidentiality Impact*, *Integrity Impact*, *Availability Impact* являются постусловиями эксплуатации уязвимостей, т. е. постусловиями успешной реализации атаки, и помимо формирования графа применяются при оценке защищенности компьютерной сети для определения ущерба в результате реализации атаки [23, 24].

**Шаг 2.** После формирования матриц возможных атакующих действий для каждого хоста анализируемой сети на основе уровня знаний нарушителя выбираются атакующие действия, доступные конкретной модели нарушителя. На данном этапе могут быть использованы сразу несколько моделей нарушителей.

Далее на основе анализа связей компьютерной сети и множества атакующих действий, ограниченного возможностями нарушителя, формируется граф доступности хостов одновременно для всех нарушителей.

**Шаг 3.** На основе графов доступности формируются графы атак для начальных точек доступа, доступных каждому нарушителю. Данный шаг включает ряд действий для каждого нарушителя. Рассмотрим данные действия более подробно.

**Шаг 3.1.** Формирование множества хостов, к которым есть доступ у нарушителя, в соответствии с исходными данными.

**Шаг 3.2.** Получение максимально возможных привилегий на каждом доступном хосте на ос-

нове использования доступных атакующих действий (на основе анализа поля *Gained Privileges* уязвимостей соответствующей группы).

**Шаг 3.3.** Выполнение атакующих действий, направленных на нарушение конфиденциальности, целостности и доступности информации, хранящейся на хосте. Если для нарушителя доступны только права пользователя в соответствии с метриками *Access Vector* и *Authentication*, то атакующие действия ограничиваются доступными только локальным и удаленным пользователям. Влияние определяется на основе анализа полей *Confidentiality Impact*, *Integrity Impact* и *Availability Impact* уязвимостей соответствующей группы.

**Шаг 3.4.** Для каждого доступного хоста, на котором нарушитель может получить права администратора, составляется список обнаруженных связанных с ним хостов, для которых возможно проведение атаки сбора информации.

**Шаг 3.5.** Составление списка обнаруженных связанных хостов, для которых нарушитель может определить конфигурацию программно-аппаратного обеспечения.

**Шаг 3.6.** Выполнение шага 3.2 для полученного на шаге 3.4 списка. Каждое действие шагов 3.2–3.4 алгоритма добавляет новые атакующие действия, относящиеся к выбранной модели нарушителя, в граф атак.

При этом для каждого хоста формируется направленный граф использования уязвимостей, определяющий возможные последовательности эксплуатации уязвимостей нарушителем. Так, в качестве первого шага нарушитель может реализовать атаки, которые не требуют наличия локального доступа и учетной записи и направлены на: 1) нарушение конфиденциальности, целостности и доступности информации; 2) получение прав доступа учетной записи пользователя системы; 3) получение прав доступа учетной записи администратора системы.

Далее если нарушитель получил доступ к любой учетной записи, он может выполнять атаки, направленные на нарушение конфиденциальности, целостности и доступности информации, которые требуют наличия локального доступа. Если нарушитель получил доступ к учетной записи пользователя, он может повысить свой уровень доступа до администраторского с помощью атак, направленных на повышение привилегий. Далее при наличии прав администратора нарушитель может выполнять любые атаки, направленные на нарушение конфиденциальности, целостности и доступности информации.

В результате работы данного алгоритма для каждого нарушителя формируется граф связанных хостов, включающий в себя множество пересекающихся графов, начинающихся от началь-

ных хостов нарушителя и включающих в себя подграфы эксплуатируемых уязвимостей и атакующие действия, направленные на сбор информации. При этом каждый хост в графе характеризуется уровнем нарушения свойств конфиденциальности, целостности и доступности, а также правами доступа, полученными нарушителем в результате эксплуатации уязвимостей.

### Формирование графов атак на основе формата CVSS версии 3.0

Основными недостатками подхода к построению графов атак, представленного в предыдущем разделе, являются неточности при использовании описаний уязвимостей. Так, например, ущерб конфиденциальности, целостности и доступности определяется по метрикам уязвимости группы *Impact*. Но эти метрики не определяют область влияния уязвимости (информация в приложении, информация в операционной системе или вся информация на жестком диске). В построенный граф также попадали уязвимости, требующие активных действий от атакуемого хоста (например, перехода по вредоносной ссылке), что не всегда возможно (например, использование таких атак невозможно против серверных хостов). Данные проблемы обуславливают необходимость перехода на стандарт описания уязвимостей CVSS версии 3.0.

Общая структура алгоритма построения графов атак при переходе от CVSS версии 2.0 к версии 3.0 практически не меняется. Но использование стандарта CVSS версии 3.0 позволяет уточнить построенные графы атак, что приводит к повышению обоснованности построенной модели и, как следствие, повышает точность оценки защищенности компьютерной сети [25, 26].

Изменения коснутся шага 1 алгоритма, представленного в предыдущем подразделе, так как изменятся как сформированные на данном шаге группы, так и значения соответствующих метрик CVSS. Вследствие этого изменятся результаты, получаемые на шаге 3 алгоритма.

Поскольку определяемый класс атак учитывает метрики *Confidentiality Impact*, *Integrity Impact* и *Availability Impact*, а также получаемые привилегии, изменятся формируемые классы. Это обусловлено изменением значения метрик ущерба (что повлияет также на численные оценки уровня ущерба и уровня риска при оценке защищенности). Кроме того, появилась метрика *Scope*, на основе которой уточняется область влияния уязвимостей (приложение, операционная система, песочница) и определяется возможный доступ к ресурсам (файлам, ЦПУ, памяти и т. п.). Это приведет к тому, что для ряда атак, для которых *Scope* является неизменным и не затрагивает системные ресурсы, получение прав

не приведет к получению прав на хосте. Кроме того, будет уточнена область наносимого ущерба. Как следствие, меняется результат шага 3 (шаги 3.2, 3.3) алгоритма и список доступных хостов, формируемый на шаге 3 (шаг 3.4) алгоритма. Использование метрики *Scope* не меняет общую структуру алгоритма, но уточняет результаты анализа последствий атакующих действий на компьютерную сеть.

При формировании необходимого типа доступа и знаний нарушителя на шаге 1 алгоритма используются метрики CVSS версии 2.0 *Access Vector*, *Authentication* и *Access Complexity*.

Метрика *User Interaction*, появившаяся в CVSS версии 3.0, определяет, может ли уязвимость эксплуатироваться без участия атакуемого. На основе данной метрики и типа хостов выделяются группы уязвимостей в матрице уязвимостей на шаге 1 алгоритма, приведенного в предыдущем подразделе. Так, уязвимости, не требующие участия атакуемого, могут быть эксплуатированы без ограничений. Возможность эксплуатации уязвимостей, требующих участия атакуемого, определяется на основе дополнительных параметров хостов, задаваемых оператором. По умолчанию данный тип уязвимостей не может эксплуатироваться для серверных хостов. Для пользовательских хостов данные уязвимости по умолчанию считаются доступными.

Для метрики *Access Vector* изменились возможные значения, что, с одной стороны, повлияет на связи в графе, так как выделилась отдельная категория физического доступа, и ряд уязвимостей уйдет из графа, с другой стороны, изменит-

ся значение вероятности успешного выполнения атаки, применяемого при оценке защищенности.

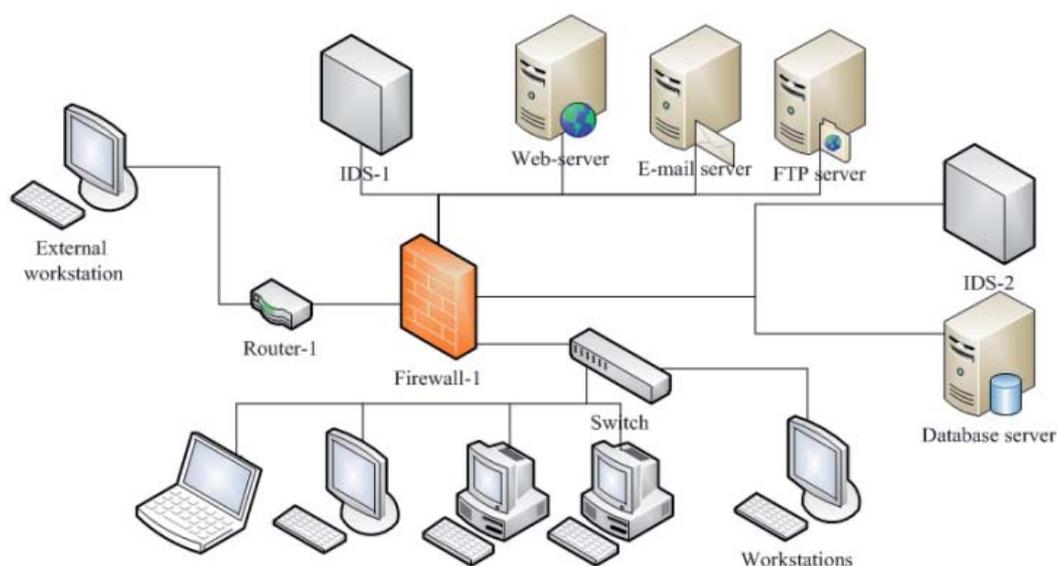
Метрика *Authentication* была заменена на метрику *Privileges Required*, что позволит более точно формировать список доступных атакующих действий при переходах между хостами и внутри хоста, а также повлияет на значение вероятности успешного выполнения атаки.

### Пример применения

Рассмотрим влияние перехода от CVSS версии 2.0 к CVSS версии 3.0 на процесс генерации графа атак и оценки защищенности.

На рисунке представлен пример сети, включающей: веб-сервер Web-server (с системой Windows Server 2008 R2 (64 бит), JBoss AS 5.0.1, фреймворком ApacheStruts2); сервер баз данных Database server (с системой Windows Server 2008 R2 (64 бит), MS SQL Server 2008 R2, CA Spectrum 9.2, EMC Unisphere для VMAX 8.1); почтовый сервер E-mail server (с системой SUSE Enterprise Linux 11 SP1 (32 бит), почтовым сервером Postfix, почтовым сервером Dovecot, MySQL); FTP сервер FTP-server (с системой Windows Server 2008 R2 (64 бит), Ipswitch WS\_FTP Server 6.1.0.0); межсетевой экран Firewall-1 (с системой Novell SUSE Linux Enterprise Server 11.0 Service Pack 3 Long Term Service Pack Support, Netfilter); рабочие станции Workstations (с системой Microsoft Windows 7 64-bit, Apple iTunes 9.0.3, Microsoft Office 2007 SP1, Microsoft Internet Explorer 7).

На небольшом фрагменте графа (примере атак) рассмотрим влияние CVSS версии 3.0.



- Пример компьютерной сети
- Test network

Удаленный пользователь (атакующий) имеет удаленный доступ к Firewall-1, на котором установлена операционная система Novell SUSE Linux Enterprise Server 11.0 Service Pack 3 Long Term Service Pack Support. В этой системе присутствует уязвимость CVE-2016-4448. Данной уязвимости присвоена как оценка CVSS версии 2.0 (10.0), так и оценка CVSS версии 3.0 (9.8). Соответствующие метрики CVSS версии 2.0 и их значения: *Access Vector* = “Network”, *Access Complexity* = “Low”, *Authentication* = “None”, *Confidentiality/Integrity* и *Availability Impact* = “Complete”. Соответствующие метрики CVSS версии 3.0 и их значения: *Attack Vector* = “Network”, *Attack Complexity* = “Low”, *Privileges Required* = “None”, *User Interaction* = “None”, *Scope* = “Unchanged”, *Confidentiality/Integrity* и *Availability Impact* = “High”. С точки зрения генерации графа атак предусловия эксплуатации уязвимости не изменились. В обоих случаях требуется сетевой уровень доступа, не требуется дополнительных привилегий и сложность атаки низкая. Отличием является то, что в случае применения CVSS версии 3.0 очевиднее, что атакующему не требуются дополнительные привилегии на хосте и не требуется взаимодействовать с пользователем для эксплуатации уязвимости. Постусловия эксплуатации уязвимости также не изменились. В обоих случаях атакующий получает привилегии администратора и может продолжить атаковать следующие доступные хосты сети, а влияние на свойства безопасности остается высоким (поскольку значение метрики *Scope* не изменилось, она не влияет на постусловия).

Далее рассмотрим, как повлияют изменения в CVSS версии 3.0 на результаты оценки защищенности, на примере упрощенного вычисления вероятности атаки (без учета предыдущих шагов атаки). Вероятность атаки с применением CVSS версии 2.0 вычислялась с использованием *Exploitability subscore* [25, 26]. Для выбранной уязвимости *Exploitability subscore* определяется следующим образом:  $2 \times AV \times AC \times Au = 1.0$  (см. табл. 2). В случае CVSS версии 3.0 максимальное значение *Exploitability subscore* 3.9, а минимальное — 0.2. Чтобы получить значение между 0 и 1.0, вычтем 0.2, поделим полученное значение на 10 и умножим на 2.7. Тогда вероятность успеха атакующего действия, использующего выбранную уязвимость, будет вычисляться с применением CVSS версии 3.0 следующим образом:  $(8.22 \times AV \times AC \times PR \times UI - 0.2) \times 2.7/10 = 1.0$  (см. табл. 2). Полученный результат совпадает с результатом согласно CVSS версии 2.0. Ущерб от атаки при использовании CVSS версии 2.0 вычислялся на основе метрик группы *Impact* с предположением, что ущерб распространяется только на уязвимый компонент [25, 26]. Поскольку для выбранной уяз-

вимости значение метрики *Scope* = “Unchanged”, подверженный влиянию компонент совпадает для обеих версий. В обоих случаях ущерб является высоким. Но согласно CVSS версии 2.0 значение ущерба для всех свойств безопасности количественно равно 0.66, а для CVSS версии 3.0 — 0.56. Значение *Impact subscore* по CVSS версии 2.0 равно 10.0, а по CVSS версии 3.0 — 5.9 (что не является максимальным значением данной метрики).

После компрометации межсетевого экрана Firewall атакующий может обнаружить другие хосты сети, например Database server. На данном сервере установлено программное обеспечение EMC Unisphere для VMAX 8.1, которое имеет уязвимость CVE-2016-6645. Данной уязвимости назначена как оценка CVSS версии 2.0 (9.0), так и оценка CVSS версии 3.0 (8.8). Соответствующие метрики и их значения согласно CVSS версии 2.0: *Access Vector* = “Network”, *Access Complexity* = “Low”, *Authentication* = “Single”, *Confidentiality/Integrity* и *Availability Impact* = “Complete”. Соответствующие метрики и их значения согласно CVSS версии 3.0: *Attack Vector* = “Network”, *Attack Complexity* = “Low”, *Privileges Required* = “Low”, *User Interaction* = “None”, *Scope* = “Unchanged”, *Confidentiality/Integrity* и *Availability Impact* = “High”. С точки зрения генерации графа атак предусловия остаются одинаковыми в случае применения обеих версий: в обоих случаях для эксплуатации уязвимости требуется сетевой доступ и привилегии на хосте. Единственным отличием является то, что в случае применения CVSS версии 3.0 очевиднее, что атакующему требуются привилегии на хосте, дающие базовые пользовательские возможности, которые влияют только на файлы и настройки данного пользователя. Это означает, что атакующий не может сразу реализовать данное атакующее действие, так как он вначале должен получить привилегии пользователя на хосте. В отличие от CVSS версии 2.0, в CVSS версии 3.0 понятнее связь между полученными и требуемыми привилегиями. В этом примере сложность атаки низкая (но в случае применения CVSS версии 3.0 очевиднее, что атакующему не требуется взаимодействовать с пользователем для эксплуатации уязвимости). Постусловия эксплуатации уязвимости также не изменились. В обоих случаях атакующий получает привилегии администратора и может продолжить атаковать следующие доступные хосты сети, а влияние на свойства безопасности остается высоким (поскольку значение метрики *Scope* не изменилось, она не влияет на постусловия).

Далее рассмотрим, как повлияют изменения в CVSS версии 3.0 на процесс оценки защищенности. Вероятность атаки с применением CVSS версии 2.0 для выбранной уязвимости вычислялась следующим образом:  $2 \times AV \times AC \times Au = 0.8$  (см.

табл. 2). В случае применения CVSS версии 3.0 вероятность успеха атакующего действия, использующего выбранную уязвимость, будет вычисляться следующим образом:  $(8.22 \times AV \times AC \times PR \times UI - 0.2) \times 2.7/10 = 0.7$  (см. табл. 2). В данном случае результат при применении CVSS версии 2.0 выше, чем результат при применении CVSS версии 3.0. Поскольку для выбранной уязвимости значение метрики *Scope* = “Unchanged”, подверженный влиянию компонент совпадает для обеих версий. В обоих случаях ущерб является высоким. Однако по CVSS версии 2.0 значение ущерба для всех свойств безопасности равно 0.66, а по CVSS версии 3.0 — 0.56. *Impact subscore* по CVSS версии 2.0 равен 10.0, а по CVSS версии 3.0 — 5.9 (что не является максимальным значением данной метрики).

Таким образом, хотя CVSS версии 3.0 принципиально не влияет на алгоритм построения графа, она позволяет снять некоторые неточности и допущения. Хотя она в то же время создает некоторые дополнительные сложности для процесса оценки защищенности.

Описанный в данной статье подход был реализован как приложение на языке Java. На сегодня полный переход к CVSS версии 3.0 в приложении невозможен, так как, во-первых, оценки по CVSS версии 3.0 существуют только для новых уязвимостей, и, во-вторых, в настоящий момент файл

.xml данных CVSS версии 3.0 на сайте NVD [21] отсутствует.

### Заключение

В статье проведен анализ изменений, введенных в новую версию системы оценки уязвимостей CVSS, а также влияния этих изменений на предложенный нами алгоритм формирования графа атакующих действий. Применение изменений при генерации графа атак и оценке защищенности показано на примере. На основе проведенного анализа сделан вывод, что применение CVSS версии 3.0 позволит устранить многие неточности, существовавшие ранее, хотя и не все. В настоящий момент невозможно автоматизировать применение нового стандарта, но в будущем планируется использовать его в приложении, разработанном авторами, наравне с CVSS версии 2.0. Кроме того, в последующей работе планируется продолжить улучшение процесса генерации графов атак с точки зрения применения шаблонов атак и дальнейшего автоматизированного выбора защитных мер.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-07-07451, 16-37-00338, 16-29-09482 офи\_м), гранта Президента РФ № МК-314.2017.9 и при частичной поддержке бюджетных тем № 0073-2015-0004 и 0073-2015-0007 в СПИИРАН.

### Литература

1. Artz M. NetSPA, a Network Security Planning Architecture: Master’s Thesis. — Massachusetts Institute of Technology, 2002. — 96 p.
2. Lippmann R. P. Validating and Restoring Defense in Depth using Attack Graphs // Proc. of MILCOM 2006. Washington, DC. P. 1–10.
3. Ingols K., Lippmann R., Piwowarski K. Practical Attack Graph Generation for Network Defense // Proc. of 22nd Annual Conf. on the Computer Security Applications, Miami Beach, FL. IEEE, 2006. P. 121–130.
4. Singhal A. Ou X. Security Risk Analysis of Enterprise Networks using Probabilistic Attack Graphs: NIST Interagency Report 7788. — Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2011. — 24 p.
5. Man D., Yang W., Yang Y., Wang W., Zhang L. A Quantitative Evaluation Model for Network Security // Proc. of the 2007 Intern. Conf. on Computational Intelligence and Security. Dec. 2007. P. 773–777.
6. Wu Y.-S., Foo B., Mao Y.-C., Bagchi S., Spafford E. H. Automated Adaptive Intrusion Containment in Systems of Interacting Services // The Intern. Journal of Computer and Telecommunications Networking. 2007. Vol. 51. P. 1334–1360.
7. Stakhanova N., Basu S., Wong J. A Cost-Sensitive Model for Preemptive Intrusion Response Systems // Proc. of the 21st Intern. Conf. on Advanced Networking and Applications. 2007. P. 1–8.
8. Liu Y., Man Y. Network Vulnerability Assessment using Bayesian Networks // Proc. of the SPIE. 2005. Vol. 5812. P. 61–71.
9. Frigault M., Wang L., Singhal A., Jajodia S. Measuring Network Security using Dynamic Bayesian Network // Proc. of the ACM Workshop on Quality of Protection. October 2008. P. 23–30.
10. Dantu R., Kolan P., Cangussu J., Dantu R., Kolan P. Network Risk Management using Attacker Profiling // Security and Communication Networks. 2009. Vol. 2. N 1. P. 83–96.
11. Wang L., Islam T., Long T., Singhal A., Jajodia S. An Attack Graph-Based Probabilistic Security Metric // Proc. of the 22nd Annual IFIP WG 11.3 Working Conf. on Data and Applications Security, Heidelberg. Springer-Verlag Berlin, 2008. P. 283–296.
12. Poolsappasit N., Dewri R., Ray I. Dynamic Security Risk Management using Bayesian Attack Graphs // IEEE Transactions on Dependable and Security Computing. 2012. Vol. 9. N 1. P. 61–74.
13. Kotenko I., Chechulin A. Computer Attack Modeling and Security Evaluation based on Attack Graphs // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS’2013):

- Proc. of the IEEE 7th Intern. Conf. Berlin, Germany, September 2013. P. 614–619.
14. **Kotenko I., Chechulin A.** A Cyber Attack Modeling and Impact Assessment Framework // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Cyber Conflict 2013 (CyCon 2013). Tallinn, Estonia: IEEE and NATO COE Publications, June 2013. P. 119–142.
  15. **Дойникова Е. В., Котенко И. В.** Методики и программный компонент оценки рисков на основе графов атак для систем управления информацией и событиями безопасности // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 54–65. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.54
  16. **Chechulin A., Kotenko I.** Attack Tree-based Approach for Real-Time Security Event Processing // Automatic Control and Computer Sciences. 2015. Vol. 49. N 8. P. 701–704.
  17. Common Vulnerability Scoring System (CVSS-SIG). FIRST website. <https://www.first.org/cvss> (дата обращения: 18.09.2017).
  18. Common Platform Enumeration (CPE). NVD website. <https://nvd.nist.gov/cpe.cfm> (дата обращения: 18.09.2017).
  19. Common Configuration Enumeration (CCE). NVD website. <https://nvd.nist.gov/cce/index.cfm> (дата обращения: 18.09.2017).
  20. **Mell P., Scarfone K., Romanosky S.** A Complete Guide to the Common Vulnerability Scoring System Version 2.0 (CVSS). 2007. — 23 p. <https://www.first.org/cvss/v2/guide> (дата обращения: 18.09.2017).
  21. NVD website. <https://nvd.nist.gov> (дата обращения: 18.09.2017).
  22. Common Vulnerability Scoring System v3.0: Specification Document. FIRST Org. Inc, 2015. — 21 p. <https://www.first.org/cvss/specification-document> (дата обращения: 18.09.2017).
  23. **Barnum S.** Common Attack Pattern Enumeration and Classification (CAPEC). — Schema Description, 2008. — 26 p.
  24. Common Vulnerabilities and Exposures (CVE). <http://cve.mitre.org>. (дата обращения: 18.09.2017).
  25. **Kotenko I., Doynikova E.** Dynamical Calculation of Security Metrics for Countermeasure Selection in Computer Networks // Proc. of the 24th Euromicro Intern. Conf. on Parallel, Distributed and Network-based Processing (PDP 2016), Heraklion, Crete, Greece, Feb. 2016, Los Alamitos, California. IEEE Computer Society, 2016. P. 558–565.
  26. **Котенко И. В., Дойникова Е. В.** Методика выбора контрмер в системах управления информацией и событиями безопасности // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 60–69. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.60

UDC 004.056

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.76

### Computer Network Security Evaluation based on CVSS Metrics

Doynikova E. V.<sup>a,b</sup>, PhD, Tech., Researcher, doynikova@comsec.spb.ru

Chechulin A. A.<sup>a,b</sup>, PhD, Tech., Leading Researcher, chechulin@comsec.spb.ru

Kotenko I. V.<sup>a,b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, ivkote@comsec.spb.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** In modern conditions, an extremely relevant issue is the enhancement of computer networks security assessment for automated defence systems targeted on a preventive response to attacks through the application of objective quantitative security metrics calculated using the metrics of CVSS (Common Vulnerability Scoring System) and analytical models. **Purpose:** The enhancement of the previously developed approach to the security assessment based on analytical modeling, usage of open standards for security data representation and CVSS metrics through the application of new CVSS version. The approach is based on a graph model of malefactor's actions generated with CVSS metrics. Some inaccuracies in the previous CVSS version led to certain limitations in generating the graph of malefactor's actions. We assume that applying the new CVSS version metrics will enhance the graph generation procedure and the assessment of security. **Results:** The security assessment results significantly depend on the input data correctness. To get initial vulnerability scores, we use CVSS (vulnerability assessment metrics, their specification and scoring criteria) and open vulnerability databases. Some disadvantages of metrics specification in CVSS v.2 and differences in CVSS v.3 have been revealed, namely: in order to take into account some essential security characteristics, new qualitative values of metrics were introduced which were neglected before; areas of possible values of the metrics were defined, removing the uncertainty which existed before. A novel approach to attack modeling and computer network security assessment has been developed on the basis of CVSS v.3. The advantages of this approach as compared to the approach proposed by the authors earlier are described, namely: when forming the graph of malefactor's actions, the assumptions about the specification of pre and post conditions of an attack are removed. Examples of applying CVSS v.3 metrics to assess computer network security on the basis of the analytical modeling are given. **Practical relevance:** The proposed approach improves the procedures of attack graph generation and security assessment due to the novel vulnerability assessment format CVSS v.3 in the framework of computer network security assessment software.

**Keywords** — Analytical Modeling, Security Assessment, Security Metrics, Common Vulnerability Scoring System, Attack Protection, Computer Networks, Attack Graphs, Attack Trees.

## References

1. Artz M. *NetSPA, a Network Security Planning Architecture*. Master's thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2002. 96 p.
2. Lippmann R. P. Validating and Restoring Defense in Depth using Attack Graphs. *Proc. of MILCOM 2006*, Washington, DC, pp.1–10.
3. Ingols K., Lippmann R., Piwowarski K. Practical Attack Graph Generation for Network Defense. *Proc. of 22nd Annual Conf. on the Computer Security Applications*, Miami Beach, FL, IEEE, 2006, pp. 121–130.
4. Singhal A. Ou X. *Security Risk Analysis of Enterprise Networks using Probabilistic Attack Graphs*. NIST Interagency Report 7788. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2011. 24 p.
5. Man D., Yang W., Yang Y., Wang W., Zhang L. A Quantitative Evaluation Model for Network Security. *Proc. of the 2007 Intern. Conf. on Computational Intelligence and Security*, Dec. 2007, pp. 773–777.
6. Wu Y.-S., Foo B., Mao Y.-C., Bagchi S., Spafford E. H. Automated Adaptive Intrusion Containment in Systems of Interacting Services. *The Intern. Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 2007, vol. 51, pp. 1334–1360.
7. Stakhanova N., Basu S., Wong J. A Cost-Sensitive Model for Preemptive Intrusion Response Systems. *Proc. of the 21st Intern. Conf. on Advanced Networking and Applications*, 2007, pp. 1–8.
8. Liu Y., Man Y. Network Vulnerability Assessment using Bayesian Networks. *Proc. of the SPIE*, 2005, vol. 5812, pp. 61–71.
9. Frigault M., Wang L., Singhal A., Jajodia S. Measuring Network Security using Dynamic Bayesian Network. *Proc. of the ACM Workshop on Quality of Protection*, October 2008, pp. 23–30.
10. Dantu R., Kolan P., Cangussu J., Dantu R., Kolan P. Network Risk Management using Attacker Profiling. *Security and Communication Networks*, 2009, vol. 2, no. 1, pp. 83–96.
11. Wang L., Islam T., Long T., Singhal A., Jajodia S. An Attack Graph-Based Probabilistic Security Metric. *Proc. of the 22nd Annual IFIP WG 11.3 Working Conf. on Data and Applications Security*, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2008, pp. 283–296.
12. Poolsappasit N., Dewri R., Ray I. Dynamic Security Risk Management using Bayesian Attack Graphs. *IEEE Transactions on Dependable and Security Computing*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 61–74.
13. Kotenko I., Chechulin A. Computer Attack Modeling and Security Evaluation based on Attack Graphs. *Proc. of the IEEE 7th Intern. Conf. "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications" (IDAACS'2013)*, Berlin, Germany, September 2013, pp. 614–619.
14. Kotenko I., Chechulin A. A Cyber Attack Modeling and Impact Assessment Framework. *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Cyber Conflict 2013 (CyCon 2013)*, Tallinn, Estonia, IEEE and NATO COE Publications, June 2013, pp. 119–142.
15. Doynikova E. V., Kotenko I. V. Techniques and Tool for the Risk Assessment on the Base of Attack Graphs in Information and Security Event Management Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 5, pp. 54–65 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.54
16. Chechulin A., Kotenko I. Attack Tree-based Approach for Real-Time Security Event Processing. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, vol. 49, no. 8, pp. 701–704.
17. *Common Vulnerability Scoring System (CVSS-SIG)*. FIRST website. Available at: <https://www.first.org/cvss> (accessed 18 September 2017).
18. *Common Platform Enumeration (CPE)*. NVD website. Available at: <https://nvd.nist.gov/cpe.cfm> (accessed 18 September 2017).
19. *Common Configuration Enumeration (CCE)*. NVD website. Available at: <https://nvd.nist.gov/cce/index.cfm> (accessed 18 September 2017).
20. Mell P., Scarforne K., Romanosky S. *A Complete Guide to the Common Vulnerability Scoring System Version 2.0 (CVSS)*. 2007. 23 p. Available at: <https://www.first.org/cvss/v2/guide> (accessed 18 September 2017).
21. *NVD website*. Available at: <https://nvd.nist.gov> (accessed 18 September 2017).
22. *Common Vulnerability Scoring System v3.0: Specification Document*. FIRST Org. Inc, 2015. 21 p. Available at: <https://www.first.org/cvss/specification-document> (accessed 18 September 2017).
23. Barnum S. *Common Attack Pattern Enumeration and Classification (CAPEC)*. Schema Description, 2008. 26 p.
24. *Common Vulnerabilities and Exposures (CVE)*. Available at: <http://cve.mitre.org> (accessed 18 September 2017).
25. Kotenko I., Doynikova E. Dynamical Calculation of Security Metrics for Countermeasure Selection in Computer Networks. *Proc. of the 24th Euromicro Intern. Conf. on Parallel, Distributed and Network-based Processing (PDP 2016)*, Heraklion, Crete, Greece, Feb. 2016, Los Alamitos, California, IEEE Computer Society, 2016, pp. 558–565.
26. Kotenko I. V., Doynikova E. V. Countermeasure Selection in Security Management Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 3, pp. 60–69 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.60

## МАСКИРУЮЩЕЕ СЖАТИЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ВЗВЕШЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ

С. В. Беззатеев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент

Н. В. Волошина<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** для организации эффективного и безопасного хранения и передачи видеoinформации необходимо использовать две независимые и последовательные процедуры — сжатие и маскирование. При получении информации на принимающей стороне следует выполнить операции декомпрессии и дешифрации в обратном порядке, чтобы получить исходное изображение. Для выполнения процедуры декомпрессии надо иметь так называемую «кодовую книгу» аналогично ключу в процедурах шифрования и дешифрации. **Цель исследования:** разработка эффективного способа объединения процедур сжатия и маскирования для цифровых изображений. **Результаты:** предложен метод сжатия, учитывающий значимости различных частей исходного мультимедийного объекта (изображения) для повышения качества результирующего изображения после декомпрессии. Одним из наиболее эффективных подходов для разработки такого метода сжатия является использование кодов, корректирующих ошибки и позволяющих ограничить число возникающих ошибок (искажений), а также обеспечить требуемое значение коэффициента сжатия. Применение таких кодов для сжатия дает возможность распределять ошибки, которые добавляются в процессе обработки, в соответствии с предустановленной значимостью исходных элементов мультимедийного объекта. В качестве примера представлен подход, основанный на взвешенной метрике Хэмминга, гарантирующий заданное максимальное число ошибок (искажений) и учитывающий предустановленную значимость зон изображения (взвешенную структуру изображения). Для реализации предложенного метода совместного маскирования и сжатия был выбран подкласс кодов Гоппы, совершенных во взвешенной метрике Хэмминга, при этом многочлены Гоппы использовались в качестве секретного ключа. Результатом использования предложенного метода совместного маскирования и сжатия является покрытие всего изображения уникальным цифровым водяным знаком. **Практическая значимость:** практическое использование предлагаемого подхода возможно в системах с повышенными требованиями по качеству хранимых и передаваемых изображений при использовании открытых каналов передачи для обеспечения как гарантированного эффекта сжатия при заданном уровне вносимых искажений, так и защиты информации.

**Ключевые слова** — кодовое квантование, совершенные коды, взвешенная метрика расстояния, стеганография.

### Введение

В современных киберфизических системах непрерывно хранится, обрабатывается и передается большое число мультимедийных данных [1]. Информация такого типа отличается большим объемом и избыточностью, поэтому требует предварительной обработки — сжатия для эффективного использования каналов связи и памяти [2, 3]. В связи с тем, что в современных информационно-коммуникационных системах активно используются распределенные хранилища данных и открытые каналы связи, необходимо защищать хранящуюся и передаваемую информацию от несанкционированного доступа. Во многих случаях такая защита может требовать не полной недоступности информации, а лишь значительного ухудшения качества, например, для изображений в случае, когда не известен секретный ключ [4]. При этом информация может быть распознаваемой, но не пригодной для коммерческого использования. Для решения подобного типа задач можно использовать подход кодового квантования изображений на кодах Гоппы, совершенных во взвешенной метрике Хэмминга.

Декомпозиция исходного изображения на блоки с длиной  $K$  и замена этих блоков на блоки

с меньшей длиной  $k$  является очень эффективным методом преобразования изображений, например, для сжатия с потерями или установки цифрового водяного знака [5, 6]. Для реализации такого подхода необходимо изначально определить соответствующее правило, устанавливающее соотношение между исходным и результирующим блоками. Следует заметить, что если несколько блоков исходного изображения заменяются одним и тем же блоком результирующего изображения (так называемым сурьективным отображением), то это приводит к появлению ошибок в результирующем изображении, которые визуально могут проявляться как искажения исходного изображения.

### Кодовое сжатие изображений

Рассмотрим процедуру сжатия в качестве основы для построения системы эффективного хранения и передачи мультимедиаинформации в открытых и распределенных системах. При использовании сжатия для изображений должны быть определены следующие параметры:

- коэффициент сжатия  $\Theta$ ;
- коэффициент вносимых искажений  $\rho$ .

В данной работе для определенности будем считать, что число различных значений блока  $K$  равно  $N$ . Например, пусть блок исходного изображения состоит из  $m$  пикселей, а каждый пиксель состоит из  $n$  бит. Тогда  $N = 2^{mn}$  и блок исходного изображения представлен в виде двоичного кода длиной  $K = mn$ .

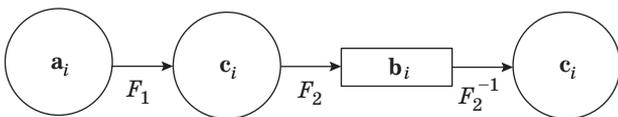
Для простоты рассмотрения, но без потери общности будем использовать один из самых простых форматов представления изображений — формат .bmp. Пусть для данного формата размер блока исходного изображения определен как  $8 \times 8$ , т. е. состоящий из  $m = 64$  пикселей. Для цветных изображений, например RGB, число бит на один пиксель может быть определено как  $n = 8 \times 3 = 24$  и, соответственно,  $K = m \times n = 64 \times 24 = 1536$ . В этом случае  $N = 2^{1536}$ . В то же время при независимом покомпонентном сжатии  $N = 2^{64 \times 8} = 2^{512}$ . Таким образом, длина блока исходного изображения определяется для каждого случая отдельно и может иметь различные значения.

Далее определим  $M$  как общее число различных значений для блоков результирующего изображения, полученного в итоге выполнения процедуры сжатия. Тогда после завершения процедуры сжатия для каждого блока исходного изображения мы получим блок результирующего изображения в виде двоичного вектора длины  $k = \log_2 M$ .

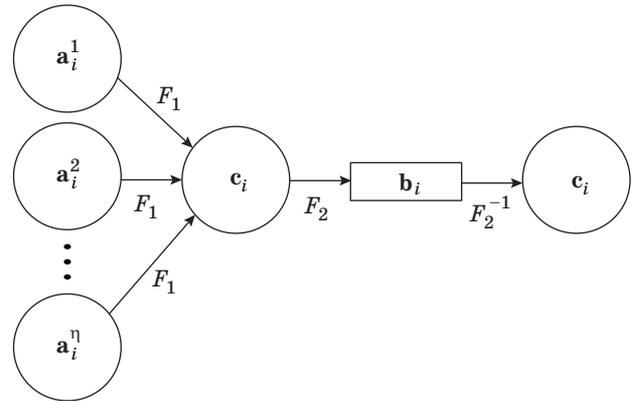
В этом случае коэффициент сжатия может быть определен как  $\Theta = K/k$ .

На рис. 1 представлена схема процедуры кодирования, при которой происходит отображение блока исходного изображения  $a_i$  длины  $K$  в блок сжатого изображения (файла)  $b_i$  длины  $k$  с дальнейшей декомпрессией в блок результирующего изображения  $c_i$ , где  $F_1$  — функция кодирования;  $F_2$  — функция построения кодовой книги;  $F_2^{-1}$  — функция декодирования. Важно отметить, что для правильного декодирования необходимо использовать тот же помехоустойчивый код, который был использован для процедур  $F_1$  и  $F_2$ .

Поскольку при кодировании в целях осуществления сжатия (кодирование)  $M < N$ , то может существовать  $\eta = \frac{N}{M}$  различных блоков исходного изображения  $\{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^\eta\}$ , преобразу-



■ **Рис. 1.** Схема процедур кодирования и восстановления  
 ■ **Fig. 1.** Code based image compression/decompression procedure scheme



■ **Рис. 2.** Суръективное отображение блоков исходного изображения при кодировании  
 ■ **Fig. 2.** Initial block to resulting compressed block mapping

емых в результате кодирования в один и тот же блок результирующего изображения  $c_i$ . Схематично суръективное отображение блоков исходного изображения в блоки проквантованного (сжатого) изображения показано на рис. 2.

Такое отображение может приводить к возникновению ошибок квантования и, как следствие, к появлению искажений в результирующем (восстановленном) изображении и тем самым к ухудшению его качества. Для оценки искажений, возникающих в процессе сжатия-восстановления, определим расстояние между исходным  $a_i$  и восстановленным после сжатия  $c_i$  блоками изображения следующим образом:

$$d_{ij} = \text{dist}(c_i, a_i^j).$$

Для минимизации вносимых искажений при кодировании можно оптимизировать (например, минимизировать) данное расстояние при определении параметров процедуры сжатия.

Для изображения величина вносимых искажений может быть оценена следующим образом:

$$\rho = \frac{R}{\sum_{i,j} d_{ij}},$$

где  $R$  — коэффициент, определяющий общие характеристики изображения.

Для изображений в качестве меры вносимых искажений  $\rho$  может быть использована хорошо известная мера PSNR — пиковое отношение сигнал/шум:

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{\max |P_i|}{RMSE},$$

где  $RMSE = \sqrt{MSE}$ ,  $MSE = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (P_i - Q_i)^2$ ,  $L$  —

общее число пикселей исходного изображения,  $P_i, Q_i$  — значения  $i$ -го пикселя исходного и восстановленного изображения соответственно.

Для изображения, состоящего из пикселей по  $n$  бит каждый, величина значения функции максимума определяется как

$$\max_i |P_i| = 2^n - 1.$$

Метрика  $PSNR$  хорошо согласуется со свойствами зрительной системы человека, а ее максимизация позволяет получать наименее заметные искажения для изображений. Известно, что приемлемое качество восстановленных изображений возможно получить при значениях  $PSNR \geq 30$  дБ.

При использовании кодового квантования для сжатия изображений в качестве метрики искажений помимо расстояния  $RMSE$  могут использоваться и другие метрики [7]. Например, можно использовать расстояние Хэмминга между двумя векторами: вектором, соответствующим блоку исходного изображения  $\mathbf{a}_i^j$ , и вектором, соответствующим блоку результирующего изображения  $\mathbf{c}_i$ :

$$d_H(\mathbf{a}_i^j, \mathbf{c}_i) = \text{number of } (l: a_{il}^j \neq c_{il}, l = 1, \dots, K),$$

где  $\mathbf{c}_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iK})$  — блок результирующего изображения с ошибкой;  $\mathbf{a}_i^j = (a_{i1}^j, a_{i2}^j, \dots, a_{iK}^j)$  —  $j$ -й блок исходного изображения. Тогда

$$\rho = \frac{R}{\sum_{i,j} d_H(\mathbf{a}_i^j, \mathbf{c}_i)},$$

где величина коэффициента  $R$  может быть выбрана специальным образом для данной метрики, например:  $R = \max_{i,j} wt_H(\mathbf{a}_i^j)$ .

Данная метрика хорошо согласуется с числом вносимых в процессе сжатия (кодового квантования) ошибок. Максимизация  $\rho$ , так же как и в случае с метрикой  $PSNR$ , приводит к минимизации числа вносимых в процессе сжатия ошибок.

Для выбранного подхода к сжатию на базе кодового квантования с использованием помехоустойчивых кодов достаточно просто реализовать процедуру кодирования, а именно функцию кодирования в процедуре сжатия  $F_1$  с использованием метрики Хэмминга. В этом случае блок исходного изображения  $\mathbf{a}_i^j$  представляется вектором длины  $K$ , подвергающимся искажениям в процессе передачи по каналу связи с ошибками. Таким образом, для исправления ошибок необходимо найти ближайшее в метрике Хэмминга кодовое слово  $\mathbf{c}_i$  некоторого, заранее определен-

ного, кода  $C$ . В этом случае величина искажений  $\rho$  определяется радиусом покрытия кода  $C$ , выбранного для сжатия данного изображения.

Радиус покрытия  $R(C)$  линейного кода  $C$  с длиной  $n$  определяется как

$$R(C) = \max \left\{ \min \{ d_H(x, c), c \in C \}, x \in F_2^n \right\}.$$

Соотношение между коэффициентом сжатия  $\Theta$ , длиной кодового слова  $\lambda$  и числом информационных символов  $\mu$  в выбранном помехоустойчивом коде  $C$  определяется следующим образом:  $\Theta = \frac{\lambda}{\mu}$ .

Для осуществления сжатия с минимальными искажениями оптимальным будет тот помехоустойчивый код, у которого радиус покрытия  $R(C)$  является минимальным. Таким образом, для выполнения процедуры сжатия с заданным параметром  $\Theta$  оптимальным помехоустойчивым кодом будет являться совершенный код. Однако множество линейных совершенных кодов, исправляющих ошибки, исчерпывается кодами Хэмминга и Голея [8]. Использование других кодов, исправляющих ошибки, таких как Боуза — Чоудхури — Хоквингема, Гоппы, Рида — Соломона, не оптимально и требует выполнения процедуры нахождения радиуса покрытия для каждого кода с заданными параметрами  $\lambda$  и  $\mu$  для нахождения подходящего кода. При этом для большинства классов кодов, исправляющих ошибки, известны только нижняя и верхняя границы радиуса покрытия. Кроме того, процедура декодирования для таких кодов с исправлением числа ошибок, превосходящего половину минимального расстояния, является весьма трудоемкой задачей, в большинстве случаев требующей перебора большого числа вариантов [9].

Следует обратить внимание, что стандартный вариант функции отображения  $F_1$  не учитывает различную значимость по восприятию искажений в изображении для элементов  $a_{il}^j$ ,  $l = 1, \dots, K$  блока исходного изображения. В то же время хорошо известно, что ошибки в битах изображения, относящихся к более старшим битовым плоскостям, оказывают больше влияния на уровень искажений результирующего изображения, чем ошибки в младших битовых плоскостях. Данную особенность можно использовать при построении системы кодового сжатия.

Для разработки процедуры отображения, учитывающей различную значимость элементов изображения (взвешенную модель изображения), в работе [6] предлагается рассматривать компоненты с различными уровнями надежности в процедуре мягкого декодирования LDPC-кодов. В работах [10, 11] также предложен метод, использующий различную значимость элементов изображения при сопоставлении различным

частям кодового слова различных весов исходя из модели взвешенной структуры изображения. Результатом такого подхода явилось использование конструкции на основе кодов, исправляющих ошибки, совершенных во взвешенной метрике Хэмминга, и имеющих соответствующие параметры. Схожий подход, основанный на использовании различной значимости элементов изображения и применении LEVC-кодов, был рассмотрен в работах [12–15]. В работе [15] приведено сравнение различных методов, использующих различную значимость элементов изображения и взвешенную метрику.

Основным достоинством первого подхода является использование механизма, позволяющего адаптироваться к значимости элементов изображения (битов на определенных битовых плоскостях) для каждого блока исходного изображения. То есть предлагается исправлять ошибки, вносимые в процессе выполнения алгоритма декодирования, учитывая ошибки, внесенные на предыдущих шагах алгоритма. С другой стороны, такая процедура сжатия имеет существенный недостаток, так как требует больших вычислительных затрат при обработке блоков исходного изображения. Вторым ограничением данного подхода является слишком грубая оценка общего числа искажений, вносимых в процессе кодового квантования исходного блока изображения. Для оценки таких искажений можно использовать границы радиуса покрытия для применяемого класса кодов, исправляющих ошибки [16], или точное значение радиуса покрытия для кода с заданной порождающей матрицей, вычисление которого в общем случае является трудоемкой задачей.

Основным преимуществом второго подхода является гарантия максимально возможной величины общего числа взвешенных искажений, приходящихся на блок исходного изображения, которая будет не более чем некоторое пороговое значение, равное радиусу покрытия кода. Кроме того, величина радиуса покрытия связана с радиусом сферической упаковки и для совершенного кода равна половине минимального расстояния. Следовательно, для его определения не требуется каких-либо сложных и трудоемких вычислений.

Таким образом, для осуществления сжатия будем использовать конструкции на основе помехоустойчивых кодов, совершенных во взвешенной метрике Хэмминга.

### Совместное маскирование и сжатие изображения с использованием помехоустойчивых кодов

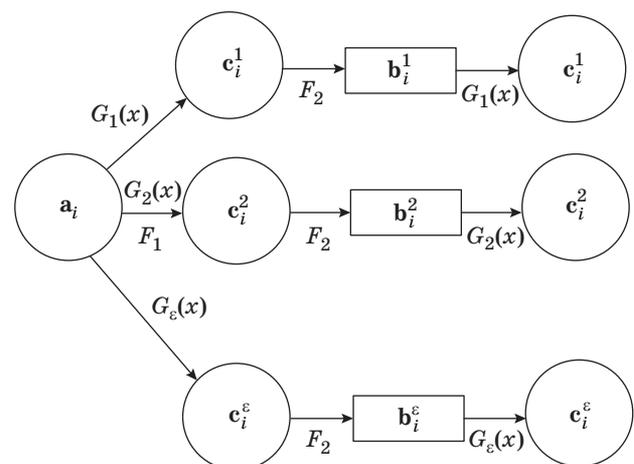
Для выбранного подхода возможна реализация в процессе кодового сжатия еще и процеду-

ры маскирования изображения. Для этого рассмотрим процедуру сжатия, использующую на первом шаге различные коды Гоппы  $\{C_1, C_2, \dots, C_\varepsilon\}$ , определенные их многочленами Гоппы  $\{G_1(x), G_2(x), \dots, G_\varepsilon(x)\}$ . В общем случае получаем различные кодовые слова для одного и того же блока исходного изображения (рис. 3).

В работе [17], где подробно описан вариант реализации первого шага сжатия (функция  $F_1$ ), предлагалось использовать коды Гоппы, совершенные во взвешенной метрике Хэмминга, для задач защиты авторских прав на изображения. В работах [17, 18] был предложен алгоритм маскирования изображений с использованием кодов Гоппы. Настоящая работа является дальнейшим развитием и агрегацией идей, изложенных в работах [17–19], позволяющим обеспечить одновременное сжатие и маскирование исходного изображения с использованием кодов Гоппы, совершенных во взвешенной метрике Хэмминга.

Рассмотрим в качестве примера простейший случай, при котором возьмем два кода Гоппы, совершенных во взвешенной метрике Хэмминга, для блока исходного изображения  $\mathbf{b}$ , состоящего из 8 пикселей, каждый из которых представлен восьмью битами. Таким образом,  $m = 8$ ,  $n = 8$ ,  $K = 64$ .

Для сжатия данного блока будем использовать два различных кода Гоппы  $C_1$  и  $C_2$  со следующими параметрами:  $\lambda_1 = 35$ ,  $\mu_1 = 29$ , при этом  $\lambda_{11} = 8$ ,  $\lambda_{12} = 27$  (где  $\lambda_{11}$  — часть блока исходного изображения, имеющая меньшую значимость, чем часть блока, соответствующая  $\lambda_{12}$ ), с  $\deg G_1(x) = 2$  и  $\lambda_2 = 29$ ,  $\mu_2 = 23$  при  $\lambda_{21} = 4$ ,  $\lambda_{22} = 6$ ,  $\lambda_{23} = 19$  (где  $\lambda_{21}$  — часть блока исходного изображения, имеющая меньшую значимость, чем часть блока,



■ **Рис. 3.** Отображение блока исходного изображения при использовании различных кодов Гоппы  
 ■ **Fig. 3.** Initial block to resulting compressed block mapping based on different Goppa codes

соответствующая  $\lambda_{22}$  и  $\lambda_{23}$ , а  $\lambda_{22}$  — меньшую, чем  $\lambda_{23}$ ) с  $\deg G_2(x) = 3$  соответственно.  $G_1(x)$  и  $G_2(x)$  — неприводимые многочлены с коэффициентами их  $GF(2^2)$  и  $GF(2^3)$  соответственно. Общее число информационных символов для этой пары кодов  $k = \mu_1 + \mu_2 = 29 + 23 = 51$ . Таким образом, коэффициент сжатия для данного примера  $\Theta = 64/51 = 1,25$ .

Далее для выбранного примера разобьем блок исходного изображения на три подблока с длинами  $K_1 = \lambda_{11} + \lambda_{21} = 12$ ,  $K_2 = \lambda_{12} + \lambda_{22} = 33$ ,  $K_3 = \lambda_{23} = 19$ . Веса блоков, отражающие влияние возникающей ошибки на результирующие искажения, определим как  $v_1 = 1$ ,  $v_2 = 2$ ,  $v_3 = 3$  соответственно. Таким образом, чем больше вес подблока, тем больше влияние происходящих в нем ошибок на результирующие искажения в изображении.

Оба кода в примере являются совершенными во взвешенной метрике Хэмминга, и радиус покрытия для приведенных кодов определяется как

$$R(C_1) = \max_{v_1 t_1 + v_2 t_2 \leq \deg G_1(x)} t_1 + t_2 = 2;$$

$$R(C_2) = \max_{v_1 t_1 + v_2 t_2 + v_3 t_3 \leq \deg G_2(x)} t_1 + t_2 + t_3 = 3.$$

Структура корректирующей способности этих кодов может быть представлена в табл. 1 и 2.

В приведенных таблицах  $t_1$  и  $t_2$  — число ошибок в подблоках кодового слова кода  $C_1$  длины  $\lambda_{11} = 8$ ,  $\lambda_{12} = 27$  соответственно. Из табл. 1 видно, что если в менее значимом подблоке  $\lambda_{11}$  произойдет одна или две ошибки, то в более значимом подблоке  $\lambda_{12}$  может произойти 0 ошибок (второй и

третий столбцы таблицы), т. е. ошибок во втором более значимом подблоке произойти не может. В то же время если ошибка произойдет во втором подблоке, то ни одной ошибки в менее значимом подблоке произойти не может. При этом максимально возможное число ошибок для подблока  $\lambda_{11}$  равно 2, а для подблока  $\lambda_{12}$  равно 1. В процессе сжатия может происходить меньшее число ошибок, но не большее. В табл. 2 приведено распределение ошибок для кода  $C_2$  при условии наличия трех подблоков. Смысл приведенных значений интерпретируется так же, как и для табл. 1.

Для того чтобы сжать блок исходного изображения, необходимо покрыть его кодовыми словами определенных выше двух кодов Гоппы  $C_1$  и  $C_2$ . Один из возможных вариантов разбиения блока исходного изображения на кодовые слова первого и второго кодов Гоппы с учетом взвешенной структуры изображения приведен на рис. 4.

Проанализируем распределение ошибок для приведенного примера. Обозначим под единым вектором  $\mathbf{l}_{678}$  множество трех векторов наиболее значащих бит изображения, обозначенных как MSB, 7LSB и 6LSB. Данный вектор состоит из 24 бит. Множество бит, состоящее из векторов 5LSB и 4LSB, обозначим как вектор  $\mathbf{l}_{45}$ , состоящий из 16 бит. Аналогично получим векторы  $\mathbf{l}_3$  (3LSB),  $\mathbf{l}_2$  (2LSB) и  $\mathbf{l}_1$  (LSB — наименее значимые биты), состоящие из 8 бит каждый. Таким образом, получаем следующую структуру блока  $\mathbf{b}$ :

$$\mathbf{b} = (\mathbf{l}_{678}, \mathbf{l}_{45}, \mathbf{l}_3, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_1).$$

Для данного вектора выпишем таблицу со значениями возможного максимального числа

■ Таблица 1. Возможное распределение ошибок в подблоке для кода  $C_1$

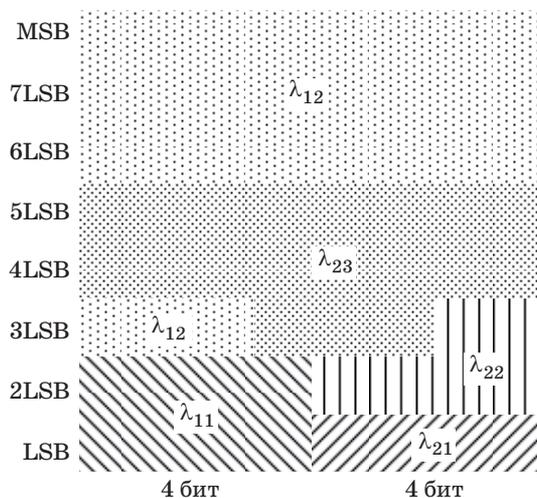
■ Table 1. Possible error distribution in the sub block for error-correcting code  $C_1$

Вес ошибки	Число ошибок	Варианты распределения ошибок по блокам кода $C_1$			
		0	0	0	1
$v_2 = 2$	$t_2$	0	0	0	1
$v_1 = 1$	$t_1$	0	1	2	0

■ Таблица 2. Возможное распределение ошибок в подблоке для кода  $C_2$

■ Table 2. Possible error distribution in the sub block for error-correcting code  $C_2$

Вес ошибки	Число ошибок	Варианты распределения ошибок по блокам кода $C_2$						
		0	0	0	0	0	1	0
$v_3 = 3$	$t_3$	0	0	0	0	0	0	1
$v_2 = 2$	$t_2$	0	0	0	0	1	1	0
$v_1 = 1$	$t_1$	0	1	2	3	0	1	0



■ Рис. 4. Вариант разбиения блока  $\mathbf{b}$  исходного изображения на кодовые слова первого и второго кодов Гоппы

■ Fig. 4. The variant of block  $\mathbf{b}$  dividing on codewords of first and second Goppa codes

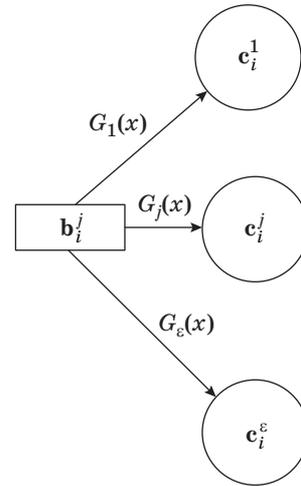
суммарных ошибок, распределенных по векторам  $I_{678}, I_{45}, I_3, I_2, I_1$ , для показанной на рис. 4 структуры. Найденное распределение приведено в табл. 3.

В таблице приведены наихудшие варианты возникновения ошибок в процессе сжатия для выбранных кодов и для выбранного распределения кодовых слов в сжимаемом блоке. Для реальных изображений распределение ошибок может оказаться существенно лучше, но не хуже.

Проанализируем возможности шифрования полученной структуры для выбранного примера. Обозначим как  $S_1$  и  $S_2$  число различных неприводимых многочленов  $G_1(x)$  и  $G_2(x)$ , определяющих различные коды Гоппы с параметрами  $\lambda_1 = 35, \mu_1 = 29$  и  $\lambda_2 = 29, \mu_2 = 23$ . Тогда  $S_1 = 28, S_2 = 20$ .

Поскольку в результате выполнения функции сжатия  $F_1$  каждый блок изображения может быть ассоциирован с одной из 560 пар для выбранных в примере параметров, принадлежащих кодам Гоппы с многочленами  $G_1(x)$  и  $G_2(x)$ , то множество таких пар можно использовать в качестве ключа шифрования и дешифрования. Если в процессе дешифрации (декомпрессии) будет использоваться другая пара кодов (иные многочлены Гоппы), чем те, которые использовались при сжатии, то результатом окажется иной блок изображения, так как он будет кодовым словом другого кода Гоппы. Данная ситуация представлена на рис. 5.

Результатом такой неправильной декомпрессии станет появление дополнительных ошибок, что в значительной степени может ухудшить ка-



■ *Рис. 5.* Декомпрессия изображения при использовании различных многочленов Гоппы в качестве ключа дешифрации  
 ■ *Fig. 5.* Image decompression by using different Goppa polynomials as a secret key

■ **Таблица 3.** Распределение максимально возможного числа суммарных ошибок по векторам  $I_{678}, I_{45}, I_3, I_2, I_1$  для кодов  $C_1$  и  $C_2$   
 ■ **Table 3.** Possible  $I_{678}, I_{45}, I_3, I_2, I_1$  variance of maximum summarize error appearance for vectors for error-correcting codes  $C_1$  and  $C_2$

Вектор	Варианты распределения максимальных суммарных ошибок по векторам I												
<b>Для кода <math>C_1</math></b>													
$I_{678}$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$I_{45}$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$I_3$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	1	0
$I_2$	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	1
$I_1$	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	0	0	1
<b>Для кода <math>C_2</math></b>													
$I_{678}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$I_{45}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$I_3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$I_2$	1	1	1	2	2	2	3	3	0	0	0	0	0
$I_1$	2	3	4	1	2	3	0	1	1	2	3	4	5

чество восстановленного после сжатия изображения.

Дополнительным эффектом от применения указанного подхода является то, что в процессе кодового сжатия с шифрованием изображение автоматически покрывается кодовыми словами выбранных в качестве ключа кодов. Данное свойство может быть использовано в качестве цифрового водяного знака для защиты авторских прав на изображения [20].

**Заключение**

Для выполнения эффективной процедуры сжатия и маскирования при условии достижения гарантированного коэффициента сжатия и гарантированного минимального числа вносимых ошибок наиболее эффективным подходом является применение помехоустойчивых кодов. При этом применение кодов Гоппы, совершенных во взвешенной метрике Хэмминга, хорошо согласовано с особенностями такого объекта обработки, как мультимедиаданные, например изображения. Данный класс кодов позволяет при осуществлении сжатия с потерями добиваться перераспределения возникающих ошибок в соответствии со взвешенной структурой изображения, т. е. осуществить перераспределение ошибок в сторону наименее значимых бит в заданной взвешенной модели объекта сжатия. Также появляется возможность реализации параллельного маскирования сжимаемого изображения в целях его защиты. Данная возможность обусловлена использованием в качестве секретного ключа заданной комбинации многочленов Гоппы, вслед-

ствие чего при декомпрессии изображений с неверным ключом восстановленное изображение имеет неприемлемое качество. Кроме того, важным свойством предложенного метода является формирование цифрового водяного знака при выполнении процедуры совместного сжатия с ма-

скированием, покрывающего все пространство изображения и являющегося основанием для защиты авторского права на изображение.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в 2017 г. (грант № 17-07-00849-А).

## Литература

1. **Cintuglu M. H., Mohammed O. A., Akkaya K., and Uluagac A. S.** A Survey on Smart Grid Cyber-physical System Testbeds // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19. N 1. P. 446–464.
2. **Mo Y., Weerakkody S., and Sinopoli B.** Physical Authentication of Control Systems: Designing Watermarked Control Inputs to Detect Counterfeit Sensor Outputs // *IEEE Control Systems*. 2015. Vol. 35. N 1. P. 93–109.
3. **Sandberg H., Amin S., and Johansson K. H.** Cyber-physical Security in Networked Control Systems: An Introduction to the Issue // *IEEE Control Systems*. 2015. Vol. 35. N 1. P. 20–23.
4. **Hu H.-T., and Hsu L.-Y.** Collective Blind Image Watermarking in DWT-DCT Domain with Adaptive Embedding Strength Governed by Quality Metrics // *Multimedia Tools and Applications*. 2017. Vol. 76. N 5. P. 6575–6594.
5. **Lai C.-C., and Tsai C.-C.** Digital Image Watermarking Using Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2010. Vol. 59. N 11. P. 3060–3063.
6. **Belogolovyi A.** Image Compression Based on LDPC Codes // *Proc. of Intern. Conf. Graphicon, 2004*. www.graphicon.ru (дата обращения: 18.09.2017).
7. **Guyeux C., and Bahi J. M.** Topological Chaos and Chaotic Iterations Application to Hash Functions // *Proc. of the 2010 Intern. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN)*. 2010. P. 1–7.
8. **Bezzateev S., and Shekhunova N.** Class of Generalized Goppa Codes Perfect in Weighted Hamming Metric // *Designs, Codes and Cryptography*. 2013. Vol. 66. N 1–3. P. 391–399.
9. **Крук Е. А., Сергеев М. Б.** О векторном квантовании изображений // *Информационно-управляющие системы*. 2013. № 3. С. 93–96.
10. **Bezzateev S., Voloshina N., and Zhidanov K.** Steganographic Method on Weighted Container // *Proc. of XIII Intern. Symp. on Problems of Redundancy in Information and Control Systems (RED)*. 2012. P. 10–12.
11. **Bezzateev S., Voloshina N., and Minchenkov V.** Special Class of (L,G) Codes for Watermark Protection in DRM // *Proc. of 8th Intern. Conf. on Computer Science and Information Technologies*. 2011. P. 225–228.
12. **Feng K., Xu L., Hickernell F.** Linear Error-Block Codes // *Finite Fields Appl.* 2006. N 6. P. 638–652.
13. **Darit R., Souidi E. M.** New Families of Perfect Linear Error-Block Codes // *Intern. Journal of Information and Coding Theory (IJICOT)*. 2013. N 2(2/3). P. 84–95.
14. **Dariti R., Souidi E. M.** An Application of Linear Error-block Codes in Steganography // *Intern. Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDWC)*. 2011. Vol. 1. N 2. P. 426–433.
15. **Voloshina N., Bezzateev S., Zhidanov K.** Weighted Digital Watermarking Approaches Comparison // *Problems of Redundancy in Information and Control Systems: XV Intern. Symp., Saint-Petersburg, September 26–29, 2016*. P. 172–174.
16. **Bezzateev S., Shekhunova N.** Lower Bound of Covering Radius of Binary Irreducible Goppa Codes // *Designs, Codes and Cryptography*. 2017. Vol. 82. Iss. 1. P. 69–76.
17. **Беззатеев С. В., Волошина Н. В., Жиданов К. А.** Система формирования fingerprints статических изображений с использованием взвешенной метрики Хэмминга и модели взвешенного контейнера // *Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2014. № 2(32). С. 246–251.
18. **Беззатеев С. В., Литвинов М. Ю., Трояновский Б. К., Филатов Г. П.** Выбор алгоритма преобразования, обеспечивающего изменение структуры изображения // *Информационно-управляющие системы*. 2006. № 6. С. 2–6.
19. **Беззатеев С. В., Литвинов М. Ю., Трояновский Б. К.** Использование помехоустойчивых кодов для шифрации видеоинформации // *Информационно-управляющие системы*. 2007. № 5. С. 23–26.
20. **Bezzateev S., and Voloshina N.** Digital Watermarking Method Based on Image Compression Algorithms // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. 2017. P. 292–299.

UDC 681.3, 004.932.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.88

**Masking Compression based on Weighted Image Structure Model**Bezzateev S. V.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, bsv@aanet.ruVoloshina N. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, nataliv@yandex.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** To organize efficient and safe storage and transmission of video information, two independent sequential procedures are necessary: compression and masking. To get the initial image at the receiver's end, the operations of decompression and decryption should be performed in the reverse order. For decompression, you need to have so-called "code book" which is similar to a key in encryption and decryption. **Purpose:** An efficient way to combine the procedures of compression and masking for digital images. **Results:** A compression method is proposed which takes into account the significance of various parts of the original multimedia object (image) to improve the quality of the resulting image after the decompression. One of the most effective approaches to solve this problem is using Error Correcting Codes, thus limiting the number of compression errors (distortions) and ensuring the required value of the compression ratio. The use of such codes for compression makes it possible to distribute the errors added during the processing in accordance with the predefined significance of the original multimedia object elements. As an example, we present an approach based on the weighted Hamming metric which allows you to ensure a predefined maximum number of errors (distortions) and takes into account the predefined significance of image zones (weighted image structure). To implement the proposed method of combined masking and compression, we chose a subclass of Goppa codes which are perfect in a weighted Hamming metric. Goppa polynomials were used as a secret key. The result of using the proposed method was covering the entire image with a unique digital watermark. **Practical relevance:** The proposed approach can be applied in systems with increased quality demands concerning the stored and transmitted images when using open transmission channels. It will provide a guaranteed compression effect at a given level of the introduced distortions and a high level of information protection.

**Keywords** — Compression Based on Codes, Perfect Codes, Weighted Distance Metric, Steganography.

**References**

- Cintuglu M. H., Mohammed O. A., Akkaya K., and Uluagac A. S. A Survey on Smart Grid Cyber-physical System Testbeds. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 446–464.
- Mo Y., Weerakkody S., and Sinopoli B. Physical Authentication of Control Systems: Designing Watermarked Control Inputs to Detect Counterfeit Sensor Outputs. *IEEE Control Systems*, 2015, vol. 35, no. 1, pp. 93–109.
- Sandberg H., Amin S., and Johansson K. H. Cyberphysical Security in Networked Control Systems: An Introduction to the Issue. *IEEE Control Systems*, 2015, vol. 35, no. 1, pp. 20–23.
- Hu H.-T., and Hsu L.-Y. Collective Blind Image Watermarking in DWT-DCT Domain with Adaptive Embedding Strength Governed by Quality Metrics. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, vol. 76, no. 5, pp. 6575–6594.
- Lai C.-C. and Tsai C.-C. Digital Image Watermarking Using Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, vol. 59, no. 11, pp. 3060–3063.
- Belogolovyi A. Image Compression based on LDPC Codes. *Proc. of Intern. Conf. Graphicon*, 2004. Available at: www.graphicon.ru (accessed 18 September 2017).
- Guyeux C., and Bahi J. M. Topological Chaos and Chaotic Iterations Application to Hash Functions. *Proc. of the 2010 Intern. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN)*, 2010, pp. 1–7.
- Bezzateev S., and Shekhunova N. Class of Generalized Goppa Codes Perfect in Weighted Hamming Metric. *Designs, Codes and Cryptography*, 2013, vol. 66, no. 1-3, pp. 391–399.
- Krouk E. A., Sergeev M. B. Vector Quantization of Images. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 3, pp. 93–96 (In Russian).
- Bezzateev S., Voloshina N., and Zhidanov K. Steganographic Method on Weighted Container. *Proc. of XIII Intern. Symp. on Problems of Redundancy in Information and Control Systems (RED)*, 2012, pp. 10–12.
- Bezzateev S., Voloshina N., and Minchenkov V. Special Class of (L,G) Codes for Watermark Protection in DRM. *Proc. of 8th Intern. Conf. on Computer Science and Information Technologies*, 2011, pp. 225–228.
- Feng K., Xu L., Hickernell F. Linear Error-Block Codes. *Finite Fields Appl.*, 2006, no. 6, pp. 638–652.
- Dariti R., Souidi E. M. New Families of Perfect Linear Error-Block Codes. *Intern. Journal of Information and Coding Theory (IJICOT)*, 2013, no. 2(2/3), pp. 84–95.
- Dariti R., Souidi E. M. An Application of Linear Error-block Codes in Steganography. *Intern. Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDWC)*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 426–433.
- Voloshina N., Bezzateev S., Zhidanov K. Weighted Digital Watermarking Approaches Comparison. *Proc. of XV Intern. Symp. "Problems of Redundancy in Information and Control Systems"*, Saint-Petersburg, September 26–29, 2016, pp. 172–174.
- Bezzateev S., Shekhunova N. Lower Bound of Covering Radius of Binary Irreducible Goppa Codes. *Designs, Codes and Cryptography*, 2017, vol. 82, no. 1, pp. 69–76.
- Bezzateev S. V., Voloshina N. V., Zhidanov K. A. The Method of Digital Fingerprinting for Static Images Based on Weighted Hamming Metric and on Weighted Container Model. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki* [Proc. of TUSUR], 2014, no. 2, pp. 246–251 (In Russian).
- Bezzateev S. V., Litvinov M. Y., Troyanovskii B. K., Filatov G. P. The Choice of the Transformation Algorithm that Ensures a Structural Change of Videoinformation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2006, no. 6, pp. 2–6 (In Russian).
- Bezzateev S. V., Litvinov M. Y., Troyanovskii B. K. Using Error-Correcting Codes for Video Information Encoding. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2007, no. 5, pp. 23–26 (In Russian).
- Bezzateev S., and Voloshina N. Digital Watermarking Method based on Image Compression Algorithms. In: *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, 2017, pp. 292–299.

# МЕТОД СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ПОТЕРЬ С ПОМОЩЬЮ КОНТЕКСТНОГО КОДИРОВАНИЯ ПО ДВОИЧНЫМ УРОВНЯМ

Н. Д. Егоров<sup>а</sup>, аспирант

Д. В. Новиков<sup>а</sup>, программист, инженер

М. Р. Гильмутдинов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** визуальные данные в исходном виде занимают весомый объем дискового пространства, при этом данные изображения ввиду важности содержащейся в них информации требуется хранить с применением таких методов, которые не приведут к появлению на них никаких искажений. Для решения этой задачи используются методы сжатия изображений без потерь. **Цель:** разработка эффективного метода сжатия изображений без потерь. **Результаты:** разработан метод сжатия изображений без потерь с помощью контекстного кодирования по двоичным уровням. Доказано, что лежащий в основе данного метода сжатия способ кодирования изображения по двоичным уровням унарного кода не приводит к увеличению энтропии источника. На известных тестовых множествах изображений проведен сравнительный анализ эффективности сжатия данных разработанным методом и алгоритмами JPEG-LS и JPEG-2000 для сжатия изображений без потерь. Получаемые с помощью предложенного алгоритма файлы в среднем на 16,53 и 6,84 % меньше, чем файлы, получаемые с помощью алгоритмов JPEG-LS и JPEG-2000 соответственно. **Практическая значимость:** разработанный метод позволит сэкономить ресурсы, требуемые для хранения визуальных данных, ввиду более компактного представления этих данных.

**Ключевые слова** — сжатие изображений, сжатие без потерь, кодирование ошибок предсказания, контекстное моделирование, бинаризация.

## Введение

Постоянное улучшение качества (повышение разрешения и числа бит, используемого для представления пикселя) и увеличение количества получаемых визуальных данных (изображений) приводят к росту затрат на их хранение — построению новых центров хранения данных. В связи с этим задача компактного представления визуальных данных особенно актуальна в последние годы. Для ее решения было предложено два основных подхода [1, 2]:

— сжатие без потерь — вся информация, содержащаяся на исходном изображении, представлялась в более компактном виде за счет применения различных методов кодирования источника;

— сжатие с потерями — для повышения эффективности сжатия допускалось частичное уничтожение или искажение информации, содержащейся в исходном изображении.

В данной работе исследуются способы сжатия различных классов изображений, относящихся к общему классу высокоточных данных. Для подобных изображений потеря и искажение хранимых в них данных являются критичными, поэтому методы сжатия с потерями не рассматриваются.

Сжатие без потерь осуществляется за счет анализа статистики кодируемого источника. Задача оценки статистики источника осложнена тем, что большинство источников визуальных данных содержат внутренние зависимости (являются ис-

точниками с памятью). Для упрощения решения данной задачи используется следующий подход: сначала к источнику применяется декоррелирующее преобразование для учета памяти источника (устранения имеющейся избыточности), затем — один из разработанных методов кодирования источника без памяти [3, 4]. Типовая схема сжатия изображений на основе данного подхода (рис. 1) включает решение нескольких подзадач:

1) декорреляции данных — устранения присутствующей в данных источника избыточности;

2) контекстного моделирования — разбиения исходного потока данных на подпотоки для оценки статистики источника с учетом оставшихся после предыдущего шага зависимостей;

3) кодирования источника — оценки распределения источника и построения наиболее эффективного кода для компактного представления его (источника) данных. Методы кодирования источника без памяти являются наиболее распространенными и делятся на 2 класса: неадаптивные (предполагают, что входные данные имеют стационарное распределение, не зависящее от времени) и адаптивные.

Для решения первой подзадачи обычно применяются методы, относящиеся к классу алгоритмов Difference Pulse-Code Modulation (DPCM). Текущее обрабатываемое значение предсказывается по набору ранее обработанных данных. Далее вычисляется разность между результатом предсказания  $\hat{x}$  и текущим обрабатываемым



■ **Рис. 1.** Типовая схема сжатия изображений  
 ■ **Fig. 1.** Typical image compression scheme

значением  $x$ :  $e = \hat{x} - x$ , где  $e$  — ошибка предсказания.

В предыдущих работах [5–7] было предложено использовать Active Level Classification Model (ALCM) предсказания [8] в рамках DPCM-класса. Для решения второй и третьей подзадач эффективного кодирования получаемого потока декоррелированных данных (ошибок предсказания) нами использовалась схема, состоящая из двоичного арифметического кодирования и контекстного моделирования по двоичным уровням — Binary Layers Scanning (BLS) [5–7].

В настоящей работе представлены улучшения предложенной схемы, а также доказательство того, что лежащий в основе данного метода сжатия способ кодирования изображения по двоичным уровням унарного кода не приводит к увеличению энтропии источника.

**Схема кодирования ошибок предсказания и ее улучшения**

Применяемая схема сжатия, впервые введенная в статье [5], предполагает, что цветовые компоненты изображения с размерами  $W$  (ширина) на  $H$  (высота) уже были обработаны с помощью DPCM-алгоритма. Полученные в результате ошиб-

ки предсказания, также имеющие размерность  $W \times H$ , обрабатываются независимо.

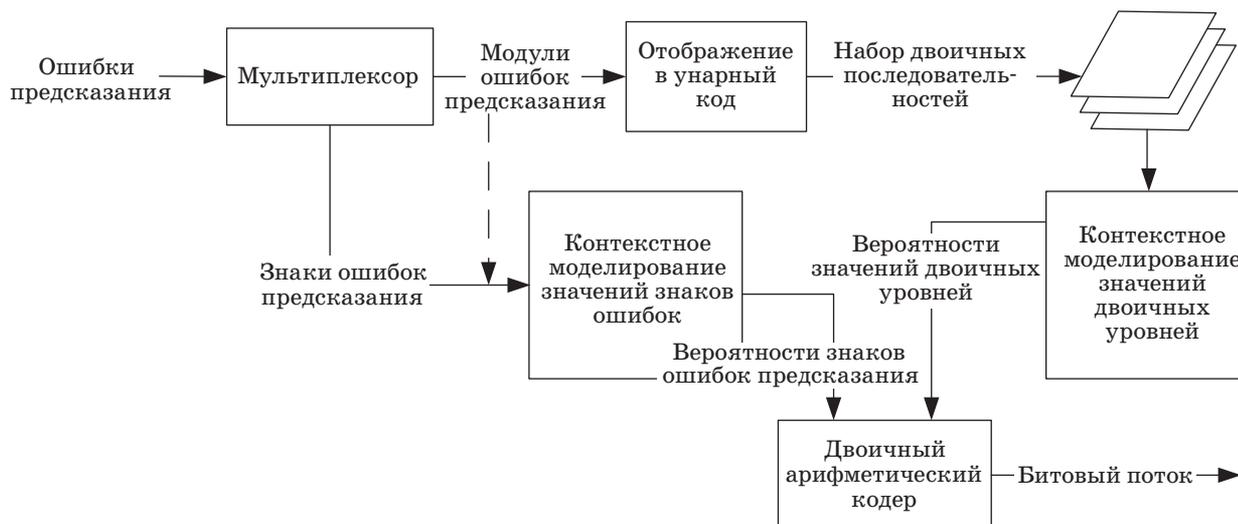
В основе данной схемы лежит идея о применении двоичного арифметического кодера, что помогает добиться универсальности схемы сжатия, доступности ее реализации за счет простоты выполнения оценки вероятности кодируемых символов. Рассмотрим основные особенности схемы кодера (рис. 2).

**Раздельная обработка знаков и модулей ошибок предсказания**

В качестве входных данных используется множество ошибок выбранного метода предсказания, значения которых лежат в диапазоне  $[-I^{\max}, I^{\max}]$ , где  $I^{\max}$  — максимально возможное значение обрабатываемых визуальных данных (для 8-битного изображения  $I^{\max} = 255$ ). Каждая ошибка предсказания представляется в виде пары последовательно кодируемых значений — модуля ошибки предсказания и знака:

$$\begin{cases} |e_{i,j}| = |e_{i,j}| \\ \text{знак}_{i,j} = \text{знак}(e_{i,j}) \end{cases},$$

где  $e_{i,j}$  — ошибка предсказания на позиции  $i,j$ ;  $|e_{i,j}|$  — модуль ошибки предсказания. Значение



■ **Рис. 2.** Схема кодера BLS  
 ■ **Fig. 2.** BLS codec scheme

знака определяется посредством индикаторной функции:

$$\text{знак}(e_{i,j}) = \begin{cases} -1, & \text{если } e_{i,j} < 0 \\ 0, & \text{если } e_{i,j} = 0 \\ 1, & \text{если } e_{i,j} > 0 \end{cases}$$

В предложенной схеме первым кодируется значение модуля ошибки предсказания, что позволяет пропустить кодирование знака в случае, если модуль был равен нулю.

### Бинаризация с помощью унарного кода

Применение двоичного арифметического кодера требует бинаризации — процедуры представления символа недвоичного источника в виде последовательности двоичных символов. Для этих целей была выбрана процедура бинаризации с помощью унарного кода:

$$\text{Unary}(x) = (b^{(0)}, b^{(1)}, \dots, b^{(x)}),$$

где  $x$  — бинаризуемое значение;  $b^{(i)}$  — функция-индикатор:

$$b^{(i)} = \begin{cases} 0, & \text{если } i < x \\ 1, & \text{если } i = x \end{cases}$$

Доказательство того, что метод кодирования изображения по двоичным уровням унарного кода не приводит к увеличению энтропии источника, представлено в следующем разделе.

### Способ формирования двоичных уровней для представления модулей ошибок предсказания

Полученный набор  $W \times H$  двоичных последовательностей представляют в виде набора дво-

ичных уровней, где  $k$ -й двоичный уровень формируется из значений, выбранных с  $k$ -й порядковой позиции унарного кода модуля ошибки предсказания. Количество двоичных уровней  $N$  будет равно максимальному значению среди всех модулей ошибок предсказания. Значение, находящееся на позиции  $(i, j)$  в  $k$ -м двоичном уровне, определяется по формуле

$$l_{i,j}^{(k)} = \begin{cases} 0, & \text{если } |e|_{i,j} > k \\ 1, & \text{если } |e|_{i,j} = k \\ -, & \text{если } |e|_{i,j} < k \end{cases}$$

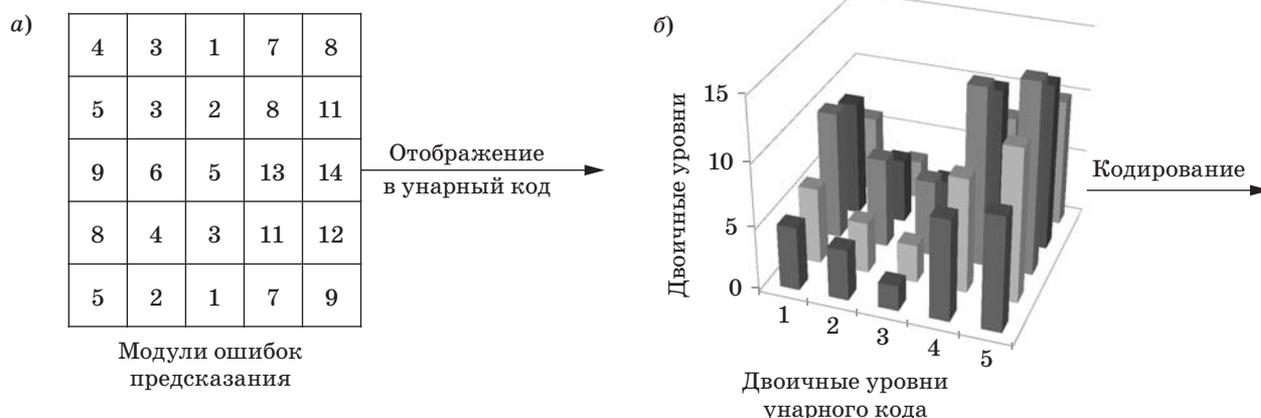
где ‘-’ обозначает то, что в  $(i, j)$  в  $k$ -м двоичном уровне отсутствует значение и процедура кодирования производиться не будет.

На рис. 3, а представлены значения модулей ошибок предсказания двумерного фрагмента изображения  $5 \times 5$ ; на рис. 3, б отображен набор двоичных уровней, сформированных из двоичных последовательностей унарного кода.

После формирования двоичных уровней для каждого пикселя производится обработка значений одного двоичного уровня за другим, начиная с 0-го уровня.

### Контекстное моделирование знаков и модулей ошибок предсказания

Новый источник данных в виде ошибок предсказания, а соответственно, и получаемые из него двоичные уровни и знаки не являются источниками без памяти. Для учета этого их свойства при кодировании применяется подход, называемый контекстным моделированием. Контекстное моделирование предполагает ведение отдельной статистики (счетчиков частот) в зависимости от



■ **Рис. 3.** Фрагмент изображения  $5 \times 5$  с соответствующими значениями модулей ошибок предсказания (а) и набор двоичных уровней (б), сформированный с помощью двоичных последовательностей унарного кода  
 ■ **Fig. 3.** Image region  $5 \times 5$  with error module values (а), and set of binary layers (б) formed using binary vectors of unary code

контекста — набора значений, окружающих текущее обрабатываемое значение. Значения, определяющие контекст, называются опорными соседями. Число контекстов напрямую зависит от числа опорных соседей.

С одной стороны, увеличение количества используемых соседей позволяет схеме контекстного моделирования покрывать больше случаев поведения контуров на изображении и повышает эффективность сжатия. С другой стороны, увеличение числа опорных соседей приводит к усложнению схемы кодирования за счет большого количества контекстных моделей. Кроме того, на практике при использовании очень большого количества контекстов в каждый контекст попадает небольшое количество данных, недостаточное для выполнения точной оценки вероятности, приводящее к падению эффективности сжатия.

В работе [6] были определены наиболее релевантные позиции опорных соседей для построения контекстов (рис. 4). Позиции опорных соседей для контекстного моделирования двоичных уровней (рис. 5, а) и знаков (рис. 5, б) были выбраны в соответствии с публикациями различных авторов [9, 10].

Номер контекстной модели  $Idx$ , применяемой для обработки значения двоичного уровня с позиции  $(i, j)$ , определяется количеством ненулевых значений, присутствующих на позициях используемых опорных соседей, по формуле

$$Idx_{i,j}^{(k)} = \sum_{n,m \in N_{i,j}} I(i+n, j+m)^{(k)},$$

где  $N_{i,j}$  — множество позиций используемых опорных соседей для кодирования значения с позиции  $(i, j)$  и двоичного уровня  $k$ ;  $I(.,.)^{(k)}$  — индикаторная функция:

$$I(i, j)^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{если } l_{i,j}^{(k)} = 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Номер контекстной модели, применяемой для обработки значения знака ошибки с позиции  $(i, j)$ , определяется размещением значений знаков с позиций используемых опорных соседей. Для получения уникального номера для каждого возможного размещения значений знаков с используемых позиций применяется формула

$$Idx_{i,j} = \text{sign}((i, j) + \mathbf{a}) + 3 \text{sign}((i, j) + \mathbf{b}) + 9 \text{sign}((i, j) + \mathbf{c}) + 27 \text{sign}((i, j) + \mathbf{d}),$$

где  $\{\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}\}$  — векторы, содержащие сдвиги от текущей позиции  $(i, j)$  до позиций соседних значений, используемых в контекстном моделировании (см. рис. 5, б).

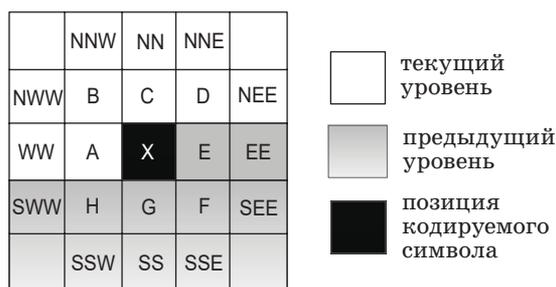


Рис. 4. Набор релевантных позиций соседей при контекстном моделировании  
 Fig. 4. Set of neighbor's positions used in context modeling

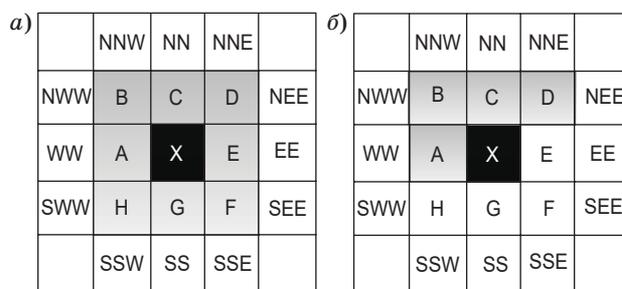


Рис. 5. Набор релевантных позиций соседей при контекстном моделировании двоичных уровней (а) и знаков (б). Серым цветом обозначены позиции используемых соседей  
 Fig. 5. Set of neighbor's positions used in context modeling of binary layers (a) and signs (б). Used neighbor's positions are highlighted by grey color

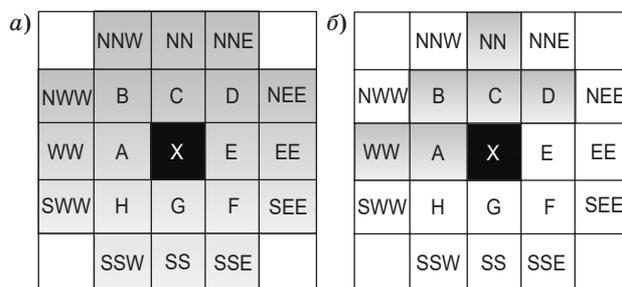


Рис. 6. Обновленный набор позиций опорных соседей при контекстном моделировании модулей (а) и знаков (б). Серым цветом обозначены позиции используемых соседей  
 Fig. 6. Updated set of neighbor's positions used in context modeling of modules (a) and signs (б). Used neighbor's positions are highlighted by grey color

В данной работе были изменены наборы используемых позиций опорных соседей для построения контекстов двоичных уровней и знаков ошибок предсказания. Новые наборы используемых позиций опорных соседей (рис. 6, а и б) были

подобраны для достижения наибольшей степени сжатия при обработке общедоступных наборов изображений, описанных в последнем разделе. Эффективность обновленной схемы продемонстрирована там же.

В следующем разделе будет доказана эффективность предлагаемого метода сжатия с помощью контекстного кодирования по двоичным уровням.

### Применение двоичного арифметического кодирования

Для кодирования источника без памяти на финальной стадии описываемой схемы сжатия используется двоичное арифметическое кодирование. Выбор арифметического кодера [4] объясняется его способностью построения оптимального с точки зрения эффективности сжатия кода для декоррелированных данных при известном распределении. Выбор именно двоичной разновидности арифметического кодирования [11, 12] объясняется практическими соображениями — простотой применения различных контекстных моделей, а также простотой реализации схемы кодирования, адаптивной к изменению статистики кодируемых данных.

Применение двоичного арифметического кодирования требует выполнения оценки распределения кодируемого источника, при этом само распределение источника может быть нестационарным. Для оценки распределения применяется известный подход, предполагающий наличие счетчиков частот обрабатываемых символов. Оценка вероятности появления кодируемого символа производится по формуле Кривичевского — Трофимова [13] для двоичного источника данных, где  $n_0, n_1$  — это счетчики ранее обработанных двоичных символов (0-го и 1-го символа соответственно):

$$p_0 = \frac{n_0 + 1/2}{n_0 + n_1 + 1}; \quad p_1 = \frac{n_1 + 1/2}{n_0 + n_1 + 1}.$$

Стоит отметить, что для устранения остаточной нестационарности в обрабатываемых данных следует учитывать изменение их характеристик с течением времени. Для этого в работе применяется известный подход, называемый экспоненциальным забыванием (Exponential Decaying Machine) [14]. Идея метода заключается в ослаблении влияния ранее обработанных символов и может быть представлена в виде следующей формулы:

$$p_1^{(t+1)} = (1 - \lambda) p_1^{(t)} + \lambda x^{(t)},$$

где  $\lambda$  — коэффициент, управляющий скоростью «забывания»;  $p_1^{(t)}$  — оценка вероятности символа

«1» в момент времени  $t$ ;  $x^{(t)}$  — символ на выходе двоичного источника в момент времени  $t$ .

Реализация экспоненциального забывания для обновления счетчиков контекстных моделей представляет собой следующий алгоритм: при обработке порогового количества значений  $Reset$  счетчики контекстной модели делятся пополам. Значение счетчика контекстной модели символа  $x$  в момент времени  $t$  имеет следующую зависимость от ранее обработанных значений:

$$n_{x,t} = \frac{e_{x,1} + \dots + e_{x,Reset}}{2} + e_{x,Reset+1} + \dots + e_{x,2Reset} + \dots + e_{x,t-1},$$

где  $e_{x,t}$  — значение, на которое был увеличен счетчик символа  $x$  в момент времени  $t$ .

### Доказательство эффективности предлагаемого метода кодирования по двоичным уровням

В основе предложенного алгоритма сжатия лежит метод бинаризации символов источника  $X$  с помощью унарного двоичного кода  $Unary(x)$  с последующим кодированием по двоичным уровням  $l_{i,j}^{(h)}$ . Для доказательства эффективности предложенной схемы покажем, что используемый способ кодирования по двоичным уровням не приводит к возникновению избыточности при кодировании данных, где под избыточностью понимается превышение количества информации, требуемой на представление (хранение) источника, над его энтропией. Наличие данной избыточности обусловлено появлением зависимостей между двоичными потоками, формируемыми с помощью позиций в двоичной последовательности, получаемой после бинаризации.

Согласно известному свойству энтропии [15], обработка информации не приводит к увеличению энтропии:

$$H(Y) \leq H(X),$$

где  $X$  — исходный ансамбль;  $Y = f(X)$  — ансамбль, полученный из исходного путем применения функции преобразования  $f(.)$  ко всем его элементам. В случае если преобразование  $f(.)$  является обратимым, данная формула будет являться равенством.

Производимую бинаризацию можно рассматривать как взаимно однозначное отображение исходного недвоичного источника  $X$  на множество независимых источников  $Y^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, N$ , где

$N$  — количество получаемых двоичных источников). Тогда в соответствии с описанным выше свойством энтропия исходного источника  $H(X)$  может быть представлена как взвешенная сумма двоичных источников, полученных после бинаризации:

$$H(X) = \sum_{i=1}^N w_i H(Y^{(i)}),$$

где  $w_i$  — вероятность того, что  $i$ -й двоичный источник используется при кодировании недвоичного символа источника  $X$ . Энтропия исходного недвоичного источника  $X$  выражается как

$$H(X) = -\sum_{i=1}^M p_i \log_2(p_i),$$

где  $M$  — мощность алфавита источника  $X$ ;  $p_i$  — вероятность символа  $i$ . Энтропия  $i$ -го двоичного источника  $Y^{(i)}$

$$H(Y^{(i)}) = -p_1^{(i)} \log_2(p_1^{(i)}) - p_2^{(i)} \log_2(p_2^{(i)}),$$

где  $p_b^{(i)}$  — вероятность появления символа  $b \in \{1, 2\}$  в  $i$ -м двоичном потоке.

Несмотря на то что процедура бинаризации является обратимой и энтропия исходного источника  $H(X)$  равна взвешенной сумме энтропий, получаемых после бинаризации двоичных источников  $w_i H(Y^{(i)})$ , использование неэффективной схемы формирования кодируемых источников может приводить к избыточности при их кодировании. В данном разделе будет показано, что формирование кодируемых источников с помощью позиций в двоичной последовательности в случае унарного кода позволяет получить безызбыточное представление, а для равномерного кода такое представление всегда будет избыточным, если распределение источника отлично от равномерного.

**Постановка задачи.** Докажем, что формирование кодируемых источников с помощью позиций в двоичной последовательности в случае унарного кода позволяет получить безызбыточное представление, т. е. энтропия исходного недвоичного источника  $X$  равна взвешенной сумме энтропий получаемых двоичных источников  $Y^{(i)}$ .

**Доказательство:** Для выбранного способа бинаризации количество получаемых двоичных источников  $N$  равно мощности алфавита исходного недвоичного источника  $M$ . Вероятность  $w_i$  того, что  $i$ -й двоичный источник был использован, будет равна вероятности того, что бинаризуемое число  $Num$ , уменьшенное на единицу, больше или равно индексу бинаризуемого источника:

$$w_i = \Pr\{Num - 1 \geq i\} = \sum_{k=i}^M p_k.$$

Тогда распределение  $i$ -го двоичного источника  $Y^{(i)}$  может быть представлено как

$$\left\{ \begin{aligned} p_1^{(i)} &= \Pr\{Num - 1 = i \mid Num - 1 \geq i\} = \frac{p_i}{\sum_{k=i}^M p_k} \\ p_2^{(i)} &= 1 - p_1^{(i)} = \frac{\sum_{k=i+1}^M p_k}{\sum_{k=i}^M p_k} \end{aligned} \right.$$

Подставим найденные вероятности  $p_1^{(i)}$  и  $p_2^{(i)}$  в формулу энтропии  $i$ -го двоичного источника:

$$H(Y^{(i)}) = -\frac{p_i}{\sum_{k=i}^M p_k} \log_2 \left( \frac{p_i}{\sum_{k=i}^M p_k} \right) - \frac{\sum_{k=i+1}^M p_k}{\sum_{k=i}^M p_k} \log_2 \left( \frac{\sum_{k=i+1}^M p_k}{\sum_{k=i}^M p_k} \right).$$

Взвешенная энтропия  $i$ -го двоичного источника

$$\begin{aligned} w_i H(Y^{(i)}) &= \left( \sum_{k=i}^M p_k \right) H(Y^{(i)}) = \\ &= -p_i \log_2 \left( \frac{p_i}{\sum_{k=i}^M p_k} \right) - \sum_{k=i+1}^M p_k \log_2 \left( \frac{\sum_{k=i+1}^M p_k}{\sum_{k=i}^M p_k} \right) = \\ &= -p_i \log_2(p_i) - \sum_{k=i+1}^M p_k \log_2 \left( \sum_{k=i+1}^M p_k \right) + \\ &\quad + \sum_{k=i}^M p_k \log_2 \left( \sum_{k=i}^M p_k \right). \end{aligned}$$

Сумма взвешенных  $i$ -го и  $(i + 1)$ -го источников равна

$$\begin{aligned} w_i H(Y^{(i)}) + w_{i+1} H(Y^{(i+1)}) &= \\ &= -p_i \log_2(p_i) - p_{i+1} \log_2(p_{i+1}) - \\ &\quad - \sum_{k=i+2}^M p_k \log_2 \left( \sum_{k=i+2}^M p_k \right) + \sum_{k=i}^M p_k \log_2 \left( \sum_{k=i}^M p_k \right). \end{aligned}$$

Из полученного выражения видно, что при сложении взвешенных энтропий  $i$ -го и  $(i + 1)$ -го источников происходит сокращение второго слагаемого  $i$ -го источника и третьего слагаемого  $(i + 1)$ -го. Рассмотрим особые случаи в виде взвешенной энтропии первого источника, предпоследнего  $(M - 1)$ -го и последнего  $M$ -го:

$$w_1 H(Y^{(1)}) = -p_1 \log_2(p_1) - \sum_{k=(2)}^M p_k \log_2 \left( \sum_{k=(2)}^M p_k \right);$$

$$w_{M-1} H(Y^{(M-1)}) = -p_{M-1} \log_2(p_{M-1}) - p_M \log_2(p_M) + \sum_{k=(M-1)}^M p_k \log_2 \left( \sum_{k=(M-1)}^M p_k \right);$$

$$w_M H(Y^{(M)}) = -p_M \log_2(p_M) + p_M \log_2(p_M) = 0.$$

Таким образом, при вычислении суммы взвешенных энтропий не сокращаются только слагаемые вида  $p_i \log_2(p_i)$ . Тогда итоговая формула суммы взвешенных энтропий  $w_i H(Y^{(i)})$  может быть записана как

$$\sum_{i=1}^N w_i H(Y^{(i)}) = -\sum_{i=1}^M p_i \log_2(p_i) = H(X).$$

Как видно из последней формулы, сумма взвешенных энтропий  $w_i H(Y^{(i)})$  равна энтропии исходного двоичного источника  $H(X)$ , что и требовалось доказать.

**Постановка задачи.** Докажем, что формирование кодируемых источников с помощью позиций в двоичной последовательности в случае равномерного кода приводит к избыточному представлению, если распределение исходного источника  $X$  отлично от равномерного.

Разобьем доказательство на две части. В первой части докажем, что в случае если исходный источник  $X$  имеет равномерное распределение, формирование кодируемых источников  $Y^{(i)}$  с помощью позиций в двоичной последовательности не приведет к увеличению энтропии, т. е.  $H(X) = w_i H(Y^{(i)})$ . Во второй части докажем, что при распределении исходного источника  $X$ , отличным от равномерного, такой способ формирования кодируемых источников будет приводить к избыточному представлению, т. е.  $H(X) \neq w_i H(Y^{(i)})$ .

**Доказательство (часть 1):** Считаем, что исходный источник  $X$  имеет равномерное распределение:

$$p_i = \frac{1}{M}, i \in [1, M].$$

Также сделаем допущение, что  $M = 2^D$ , где  $D$  — некоторое целое число. Тогда количество

получаемых двоичных источников  $N$  равно  $D$ , а вес каждого двоичного источника равен единице ( $w_i = 1$ ). Энтропия такого недвоичного источника

$$H(X) = \log_2(M) = D.$$

С учетом сделанного допущения в каждом двоичном источнике  $Y^{(i)}$  символ «1» появляется в случае бинаризации одной половины символов исходного источника  $X$ , а символ «0» — при бинаризации другой половины. Тогда закон распределения для  $i$ -го двоичного источника  $H(Y^{(i)})$  может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{cases} p_1^{(i)} = \Pr\{p_{Num} \in P^{(i)}(1)\} = \sum_{k \in K(1,i)} p_k \\ p_2^{(i)} = \Pr\{p_{Num} \in P^{(i)}(2)\} = \sum_{k \in K(2,i)} p_k \end{cases},$$

где  $p_1^{(i)}$ ,  $p_2^{(i)}$  — вероятность появления символа «0» и «1» соответственно;  $P^{(i)}(1)$ ,  $P^{(i)}(2)$  — множество, содержащее вероятности появления недвоичных символов в исходном источнике  $X$ , приводящих к появлению символа «0» и «1» соответственно в  $i$ -м двоичном источнике  $Y^{(i)}$ ;  $K(b, i)$  — множество индексов вероятностей, содержащихся в множестве  $P^{(i)}(b)$ .

Зная, что  $|K(1, i)| = |K(2, i)| = M/2$  и  $p_i = 1/M$  при любом  $i$ , упростим выражения для закона распределения  $i$ -го двоичного источника  $H(Y^{(i)})$ :

$$\begin{cases} p_1^{(i)} = \sum_{k \in K(1,i)} \frac{1}{M} = \frac{M}{2} \frac{1}{M} = \frac{1}{2} \\ p_2^{(i)} = \sum_{k \in K(2,i)} \frac{1}{M} = \frac{M}{2} \frac{1}{M} = \frac{1}{2} \end{cases}.$$

Из полученного результата следует, что энтропия любого двоичного источника  $H(Y^{(i)})$  равна единице. Тогда сумма взвешенных энтропий двоичных источников  $w_i H(Y^{(i)})$  с такими распределениями будет равна

$$\sum_{i=1}^D w_i H(Y^{(i)}) = \sum_{i=1}^D 1 \times 1 = D = H(X).$$

Как видно из полученной формулы, сумма взвешенных энтропий двоичных источников  $w_i H(Y^{(i)})$  равна энтропии исходного недвоичного источника  $H(X)$  для такого способа формирования двоичных источников, что и требовалось доказать.

**Доказательство (часть 2):** Для того чтобы распределение исходного источника  $X$  отличалось от равномерного, изменим вероятности  $(M - 1)$ -го и  $M$ -го символов следующим образом:

$$\begin{cases} p_{(M-1)} = \frac{1}{M} + \Delta \\ p_M = \frac{1}{M} - \Delta \end{cases},$$

где  $\Delta$  — некоторая константа, лежащая в диапазоне  $[0; 1/M]$ .

То, что мы изменили вероятности конкретных двух символов, никак не скажется на общности доказательства, так как энтропии двух источников, имеющих одинаковые наборы вероятностей символов, равны вне зависимости от порядка следования символов в наборе [15].

С учетом внесенных изменений энтропия исходного недвоичного источника

$$H(X) = - \sum_{i=1}^{M-2} p_i \log_2(p_i) - p_{M-1} \log_2(p_{M-1}) - p_M \log_2(p_M) = \log_2 M - \frac{2}{M} \log_2 M - \left( \frac{1}{M} + \Delta \right) \log_2 \left( \frac{1}{M} + \Delta \right) - \left( \frac{1}{M} - \Delta \right) \log_2 \left( \frac{1}{M} - \Delta \right).$$

Теперь рассмотрим, чему будет равна сумма взвешенных энтропий двоичных источников  $w_i H(Y^i)$ . Изменения  $(M-1)$ -го и  $M$ -го символов всегда выражаются в изменении энтропии только одного двоичного источника  $Y^{(0)}$ . Это объясняется тем, что двоичные коды данных символов при равномерной бинаризации различаются только в одном, младшем, разряде. Для всех остальных двоичных источников  $p_{(M-1)}$  и  $p_{(M)}$  влияют на появление символа «1». Покажем, что вероятность  $p_2^{(i)}$ , а соответственно, и  $Y^{(i)}$  при  $i \neq 0$  не изменится:

$$p_2^{(i)} = \left( \sum_{k \in K(2,i)} \frac{1}{M} \right) + p_{(M-1)} + p_{(M)} = \left( \frac{M-2}{2} \frac{1}{M} \right) + \left( \frac{1}{M} + \Delta \right) + \left( \frac{1}{M} - \Delta \right) = \left( \frac{1}{2} - \frac{2}{M} \right) + \frac{2}{M} = \frac{1}{2}.$$

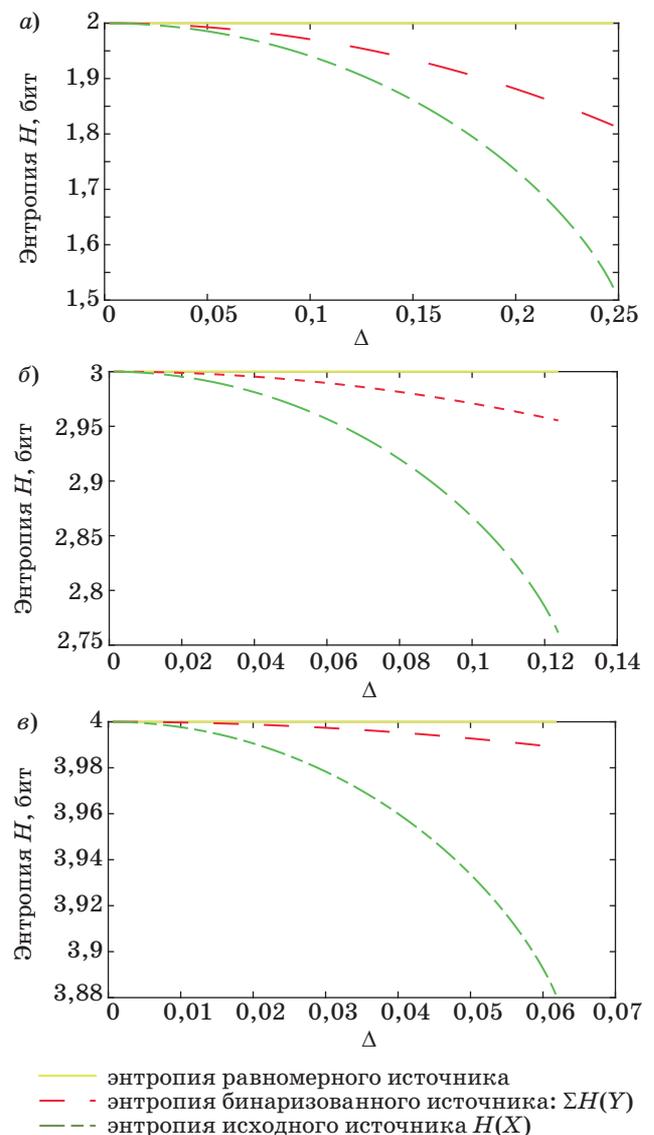
С учетом всех вышеописанных замечаний энтропия взвешенной суммы двоичных источников  $w_i H(Y^i)$  может быть представлена в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{\log_2 M} H(Y^i) = \sum_{i=1}^{(\log_2 M)-1} H(Y^i) + H(Y^{(0)}) = \log_2 M - 1 + H(Y^{(0)}) = \log_2 M - 1 - \left( \frac{1}{2} + \Delta \right) \log_2 \left( \frac{1}{2} + \Delta \right) - \left( \frac{1}{2} - \Delta \right) \log_2 \left( \frac{1}{2} - \Delta \right).$$

Дальнейшее доказательство является нетривиальной задачей ввиду наличия множества различных слагаемых в полученных формулах энтропий исходного недвоичного источника  $H(X)$  и взвешенной суммы двоичных источников  $w_i H(Y^i)$ .

Для сравнения данных значений было проведено компьютерное моделирование, согласно которому были зафиксированы значения  $M = \{4, 8, 16\}$ . Для каждого зафиксированного значения  $M$  выбиралось множество из  $10^2$  значений  $\Delta$  в диапазоне  $[0; 1/M]$ . Результаты сравнения энтропии исходного недвоичного источника и взвешенной суммы двоичных источников для различных значений  $M$  и  $\Delta$  показаны на рис. 7, а–в.

Как видно из представленных результатов, сумма взвешенных энтропий двоичных источников  $w_i H(Y^i)$  больше энтропии исходного недвоичного источника  $H(X)$  в случае его распределения, отличного от равномерного, при данном способе



■ Рис. 7. Энтропии исходного и бинаризованного источников при  $M = 4$  (а),  $M = 8$  (б) и  $M = 16$  (в) и  $\Delta$  в диапазоне  $[0; 1/M]$

■ Fig. 7. Original and binarized sources entropies for  $M = 4$  (a),  $M = 8$  (b) and  $M = 16$  (c) and  $\Delta$  in range  $[0; 1/M]$

формирования двоичных источников, что и требовалось доказать.

**Сравнительный анализ эффективности предложенного алгоритма**

Проведено сравнение эффективности предложенного алгоритма, его предыдущих версий, а также других общеизвестных алгоритмов [9, 10, 16] на различных общедоступных множествах.

Для выполнения эксперимента были выбраны следующие общедоступные множества 24-битных изображений (табл. 1):

- Lossless Photo Compression Benchmark (LPCB) [17] — содержит множество изображений с высоким разрешением. Изображения относятся к трем различным типам: натуралистичные изображения, орбитальные снимки поверхности Земли, снимки космических объектов и тел;

- Squeeze Chart (SC) [18] Benchmark — содержит небольшое множество изображений различных типов в высоком разрешении;

- Kodak [19] — популярное тестовое множество фотореалистичных изображений;

- Rawzor corpus [20] — содержит фотореалистичные изображения в высоком разрешении;

- Standard — множество из семи таких распространенных изображений, как airplane, baboon, barbara, boats, goldhill, lena, pepper с расширением .bmp.

Для контекстных моделей, используемых при кодировании знаков и модулей ошибок предсказания, на кодируемых тестовых множествах были подобраны наилучшие значения параметра *Reset*: 100 и 500 для знаков и модулей соответственно.

В качестве меры эффективности алгоритмов сжатия рассматривается среднее количество бит, затрачиваемое на компактное представление одного пикселя изображения (24 бита для рассматриваемых цветных изображений). В табл. 2 представлены результаты, полученные при использовании различных схем контекстного моделирования для модулей и знаков ошибок предсказания. Из них можно сделать вывод, что использование

■ **Таблица 1.** Характеристики используемых тестовых множеств

■ **Table 1.** Used test sets characteristics

Множество	Количество изображений	Размер, Б
LPCB	107	3 456 571 880
SC	7	242 932 451
Kodak	24	28 311 912
Rawzor	14	470 611 702
Standard	7	5 982 615

■ **Таблица 2.** Результаты сжатия предложенного алгоритма при использовании различных схем контекстного моделирования на различных множествах

■ **Table 2.** Suggested algorithm compression results for different test sets using different context modeling schemes

Множество	Схема контекстного моделирования			
	Исходная	Для знаков	Для модулей	Итоговая
LPCB	7,913	7,892	7,89	7,869
SC	10,147	10,123	10,09	10,066
Kodak	8,611	8,596	8,569	8,554
Rawzor	9,894	9,878	9,855	9,839
Standard	12,457	12,442	12,420	12,405

■ **Таблица 3.** Результаты сжатия предложенного алгоритма и различных известных алгоритмов на различных множествах

■ **Table 3.** Suggested algorithm and state-of-the-arts algorithms compression results for different test sets

Множество	Алгоритм сжатия		
	Предложенный	JPEG-LS	JPEG-2000
LPCB	7,869	8,968	8,152
SC	10,066	12,18	10,52
Kodak	8,554	13,1	9,9
Rawzor	9,839	10,64	10,62
Standard	12,405	13,91	13,12

информации от большего количества соседних значений (увеличение количества контекстов) позволяет повысить эффективность предложенного алгоритма, но лишь до определенной степени. При чрезмерном количестве использованных контекстных моделей эффективность алгоритма будет уменьшаться.

В табл. 3 содержатся результаты сжатия без потерь предложенного алгоритма с подобранными наиболее эффективными схемами контекстного моделирования знаков и модулей ошибок предсказания и таких известных алгоритмов сжатия, как JPEG-LS [9, 10] и JPEG-2000 [16]. Из имеющихся результатов можно сделать вывод об эффективности предложенного метода по сравнению с аналогами на различных классах изображений.

**Заключение**

В работе было доказано, что лежащий в основе предложенного метода сжатия способ кодирования изображений по двоичным уровням унарного кода не приводит к увеличению энтропии. Также было предложено несколько улучшений

для схем контекстного моделирования модулей и знаков ошибок предсказания.

Эффективность самой схемы и предложенных улучшений была продемонстрирована путем сравнения эффективности сжатия с предложенной ранее схемой и другими известными алгоритмами сжатия на известных тестовых множествах изображений. Полученные результаты доказывают эффективность итогового решения и актуальность проделанной работы. В дальнейшем пла-

нируется улучшение предложенного алгоритма путем его настройки для эффективного сжатия специфических классов изображений, например медицинских визуальных данных.

Егоров Н. Д. выражает благодарность за финансовую поддержку Фонду содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, оказанную при выполнении исследования в 2016 г.

## Литература

1. **Salomon D.** Data Compression. The Complete Reference. Fourth ed. — London: Springer-Verlag, 2007. — 1092 p. doi:10.1007/978-1-84628-603-2
2. **Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В.** Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. — 384 с.
3. **Huffman D.** A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes // Proc. of the IRE. 1952. N 40. P. 1098–1101. doi:10.1109/JRPROC.1952.273898
4. **Witten I. H., Radford N. M., Cleary J. G.** Arithmetic Coding for Data Compression // Communications of the ACM. 1987. Vol. 30. N 6. P. 520–540. doi:10.1145/214762.214771
5. **Gilmutdinov M., Egorov N., Novikov D.** Lossless Image Compression Scheme with Binary Layers Scanning // XIV Intern. Symp. on Problems of Redundancy in Information and Control Systems. 2014. P. 47–51. doi:10.1109/RED.2014.7016703
6. **Egorov N., Novikov D., Gilmutdinov M.** Performance Analysis of Prediction Methods for Lossless Image Compression // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2015. Vol. 40. P. 169–178. doi:10.1007/978-3-319-19830-9\_16
7. Пат. 2014148851/08 РФ. Способ сжатия изображений (варианты) / М. Р. Гильмутдинов, Н. Д. Егоров, Д. В. Новиков (РФ). — № 2579966; заявл. 04.12.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. — 2 с.
8. **Speck D.** Fast Robust Adaptation of Predictor Weights from Min/Max Neighboring Pixels for Minimum Conditional Entropy // Signals, Systems and Computers: Conference Record of the Twenty-Ninth Asilomar Conference. 1995. Vol. 1. P. 234–238. doi:10.1109/ACSSC.1995.540547
9. Information Technology — Lossless and Near-lossless Compression of Continuous-Tone Still Images: Baseline // ISO/IEC 14495-1:1999. <https://www.iso.org/standard/22397.html> (дата обращения: 02.04.2017).
10. Information Technology — Lossless and Near-Lossless Compression of Continuous-Tone Still Images: Extensions // ISO/IEC 14495-2:2003. <https://www.iso.org/standard/37700.html> (дата обращения: 02.04.2017).
11. **Marpe D., Schwarz H., Wiegand T.** Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding in the H.264/AVC Video Compression Standard // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. July 2003. Vol. 13. N 7. P. 620–636. doi:10.1109/TCSVT.2003.815173
12. **Pennebaker W. B., Mitchell J. L., Langdon G. G., Arps R. B.** An Overview of the basic principles of the Q-Coder Adaptive Binary Arithmetic Coder // IBM Journal of Research and Development. Nov. 1988. Vol. 32. N 6. P. 717–726. doi:10.1147/rd.326.0717
13. **Krichevski R. E., Trofimov V. E.** The Performance of Universal Encoding // IEEE Trans. Inform. Theory. Mar. 1981. Vol. IT-27. P. 199–207. doi:10.1109/TIT.1981.1056331
14. **Meron E.** Universal Finite Memory Prediction, Coding and Estimation of Individual Sequences: Master's thesis. — Tel-Aviv University, 2003. [http://www.eng.tau.ac.il/~ronendar/Msc\\_Thesis.pdf](http://www.eng.tau.ac.il/~ronendar/Msc_Thesis.pdf) (дата обращения: 16.05.2017).
15. **Кудряшов Б. Д.** Теория информации. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. — 188 с.
16. Information Technology — JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System // ISO/IEC 15444-1:2004. <https://www.iso.org/standard/37674.html> (дата обращения: 02.04.2017).
17. Lossless Photo Compression Benchmark by Alexander Ratushnyak. <http://www.imagecompression.info/gralic/LPCB.html> (дата обращения: 02.04.2017).
18. Squeeze Chart Benchmark. <http://www.squeezechart.com/bitmap.html> (дата обращения: 02.04.2017).
19. Kodak Lossless True Color Image Suite. <http://r0k.us/graphics/kodak/> (дата обращения: 02.04.2017).
20. High-Resolution Images Benchmark Presented by Rawzor—Lossless Compression Software for Camera Raw Images. [http://www.imagecompression.info/test\\_images/](http://www.imagecompression.info/test_images/) (дата обращения: 02.04.2017).

UDC 004.932.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.96

## Lossless Image Compression using Binary Layers Scanning Data Encoding

Egorov N. D.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, negorov.91@gmail.comNovikov D. V.<sup>a</sup>, Programmer, Engineer, dnovikov.suai@gmail.comGilmudtinov M. R.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, mgilm@vu.spb.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation

**Introduction:** Visual data in raw format take a lot of storage space. Only methods which do not lead to any information loss should be used for the storage of important content. To solve this problem, lossless compression is applied. **Purpose:** Developing an effective algorithm of lossless compression. **Results:** A lossless compression algorithm is developed which uses binary layer scanning data encoding. It has been analytically proved that usage of the proposed encoding scheme with a unary code and binary layers does not increase the entropy of the source. The proposed method was compared with JPEG-LS and JPEG-2000 algorithms on well-known benchmark images. On the average, the files obtained by the new algorithm are 16.53% and 6.84% smaller than those obtained by JPEG-LS and JPEG-2000 respectively. **Practical relevance:** The developed method allows you to save the resources for visual data storage.

**Keywords** — Image Compression, Lossless Compression, Prediction Error Encoding, Context Modeling, Binarization.

## References

- Salomon D. *Data Compression. The Complete Reference*. Fourth ed. London, Springer-Verlag, 2007. 1092 p. doi:10.1007/978-1-84628-603-2
- Vatolin D., Ratushniak A., Smirnov M., Yukin V. *Metody szhatiia dannykh. Ustroistvo arkhivatorov, szhatie izobrazhenii i video* [Image Compression Methods. Universal Archivers, Image and Video Compression]. Moscow, DIA-LOG-MIFI Publ., 2002. 384 p. (In Russian).
- Huffman D. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. *Proc. of the IRE*, 1952, no. 40, pp. 1098–1101. doi:10.1109/JRPROC.1952.273898
- Witten I. H., Radford N. M., Cleary J. G. Arithmetic Coding for Data Compression. *Communications of the ACM*, 1987, vol. 30, no. 6, pp. 520–540. doi:10.1145/214762.214771
- Gilmudtinov M., Egorov N., Novikov D. Lossless Image Compression Scheme with Binary Layers Scanning. *XIV Intern. Symp. on Problems of Redundancy in Information and Control Systems*, 2014, pp. 47–51. doi:10.1109/RED.2014.7016703
- Egorov N., Novikov D., Gilmudtinov M. Performance Analysis of Prediction Methods for Lossless Image Compression. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2015, vol. 40, pp. 169–178. doi:10.1007/978-3-319-19830-9\_16
- Gilmudtinov M., Egorov N., Novikov D. *Sposob szhatiia izobrazhenii (varianty)* [Method of Image Compression (Variants)]. Patent RU, no. 2579966, 2016.
- Speck D. Fast Robust Adaptation of Predictor Weights from Min/Max Neighboring Pixels for Minimum Conditional Entropy. *Signals, Systems and Computers. Conference Record of the Twenty-Ninth Asilomar Conference (1995)*, 1995, vol. 1, pp. 234–238. doi:10.1109/ACSSC.1995.540547
- Information Technology Lossless and Near-Lossless Compression of Continuous-Tone Still Images: Baseline*. ISO/IEC 14495-1:1999. Available at: <https://www.iso.org/standard/37674.html> (accessed 02 April 2017).
- Information Technology Lossless and Near-Lossless Compression of Continuous-tone Still Images: Extensions*. ISO/IEC 14495-2: 2003. Available at: <https://www.iso.org/standard/37674.html> (accessed 02 April 2017).
- Marpe D., Schwarz H., Wiegand T. Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding in the H.264/AVC Video Compression Standard. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, July 2003, vol. 13, no. 7, pp. 620–636. doi:10.1109/TCSVT.2003.815173
- Pennebaker W. B., Mitchell J. L., Langdon G. G., Arps R. B. An Overview of the basic principles of the Q-Coder Adaptive Binary Arithmetic Coder. *IBM Journal of Research and Development*, November 1988, vol. 32, no. 6, pp. 717–726. doi:10.1147/rd.326.0717
- Krichevski R. E., Trofimov V. E. The Performance of Universal Encoding. *IEEE Trans. Inform. Theory*, March 1981, vol. IT-27, pp. 199–207. doi:10.1109/TIT.1981.1056331
- Meron E. *Universal Finite Memory Prediction, Coding and Estimation of Individual Sequences*. Master's Thesis. Tel-Aviv University, 2003. Available at: <http://www.eng.tau.ac.il/~ronendar/Msc.Thesis.pdf> (accessed 16 May 2017).
- Kudryashov B. *Teoriia informatsii* [Information Theory]. Saint-Petersburg, ITMO Publ., 2010. 188 p. (In Russian)
- Information Technology JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System*. ISO/IEC 15444-1:2004. Available at: <https://www.iso.org/standard/37674.html> (accessed 02 April 2017).
- Lossless Photo Compression Benchmark by Alexander Ratushnyak*. Available at: <http://www.imagecompression.info/gralic/LPCB.html> (accessed 02 April 2017).
- Squeeze Chart Benchmark*. Available at: <http://www.squeezechart.com/bitmap.html> (accessed 02 April 2017).
- Kodak Lossless True Color Image Suite*. Available at: <http://r0k.us/graphics/kodak/> (accessed 02 April 2017).
- High-Resolution Images Benchmark Presented by Rawzor-Lossless Compression Software for Camera Raw Images*. Available at: <http://www.imagecompression.info/test-images/> (accessed 02 April 2017).

# РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СБОРА ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОДНОЙ МОДЕЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ТОПОЛОГИЕЙ «ПРАВИЛЬНАЯ РЕШЕТКА»

Е. А. Бакин<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

Г. С. Евсеев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

К. Н. Смирнов<sup>а</sup>, ассистент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** за последние годы в области распределенных измерительных систем появился новый подход к организации сбора информации, известный как беспроводные сенсорные сети. Этот подход получения данных является перспективным и многообещающим, однако для его эффективного прикладного использования требуется разработка особых схем передачи информационных сообщений, исключающих возможные коллизии. **Цель исследования:** разработка алгоритмов сбора данных в сенсорных сетях с топологией «правильная решетка», при которых минимизируется время получения информации о состоянии сети. **Результаты:** для беспроводных сенсорных сетей с логической структурой «все к одному» и топологиями «треугольная решетка», «квадратная решетка» и «гексагональная решетка» предложены алгоритмы составления оптимального бесконфликтного расписания передачи информационных сообщений, позволяющие минимизировать время сбора данных с устройств сети ( $N$  слотов для сети из  $N$  сенсоров). Полученные алгоритмы обладают полиномиальной сложностью и могут быть реализованы на современной элементной базе. **Практическая значимость:** результаты представленного исследования могут быть использованы разработчиками распределенных систем сбора данных на базе беспроводных сенсорных сетей при разработке сетевых протоколов передачи информации.

**Ключевые слова** — сенсорная сеть, сбор данных, коллизии, метод расписания.

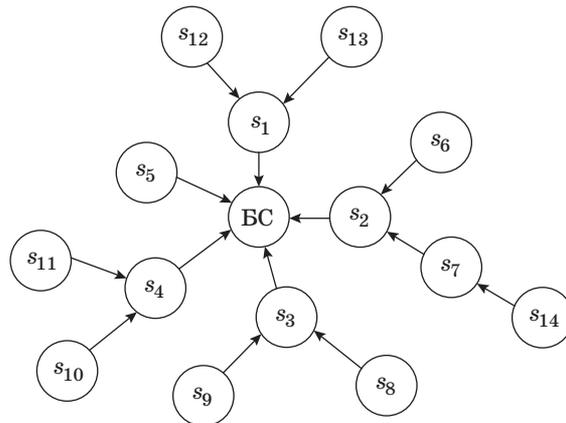
## Введение

Миниатюризация элементной базы и прогресс технологий связи создали предпосылки для появления особого типа беспроводных систем передачи информации — сенсорных сетей. Типичная сенсорная сеть состоит из множества идентичных элементов, называемых сенсорами (другое название — интеллектуальный датчик) и базовой станции (БС). Назначением сенсора является контроль состояния объекта путем измерения отдельных параметров окружающей среды (например, температуры, влажности и т. д.), первичная обработка результатов измерения, а также передача соответствующих сообщений посредством беспроводной связи. Сообщения, передаваемые сенсорами, собираются БС [1]. Таким образом, логической структурой сенсорной сети является структура «все-к-одному». Будем обозначать множество элементов сети как  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ , где  $N$  — число сенсоров в сети.

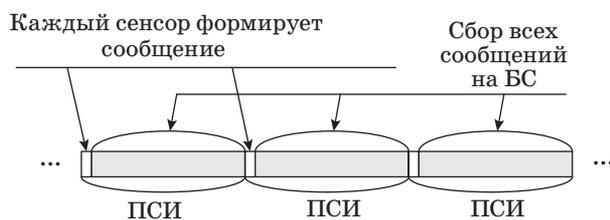
Каждый сенсор является как источником сообщений, так и их ретранслятором. Таким образом, сенсорная сеть может охватывать большие территории, протяженность которых намного превышает радиус действия передатчика одного сенсора. При этом сообщения от дальних сенсоров поступают на БС по цепочке (рис. 1).

В данной работе рассматриваются сети с циклическим сбором данных. Время работы таких

сетей можно условно поделить на периоды сбора информации (ПСИ). В начале каждого ПСИ каждый сенсор формирует по сообщению, отражающему состояние контролируемого им объекта. За оставшуюся часть ПСИ сформированные сенсорами сообщения поступают на БС (рис. 2). Пусть  $l_i$  — длина маршрута, соединяющего сенсор  $s_i$  и БС. Тогда в ходе ПСИ должно осуществиться ровно  $L = \sum_{i=1}^N l_i$  успешных передач. Обозначим это множество передач как  $P$  ( $|P| = L$ ).



■ Рис. 1. Пример сенсорной сети  
 ■ Fig. 1. Wireless sensor network



■ **Рис. 2.** Период сбора информации  
 ■ **Fig. 2.** Data collection period

Оперативность сети определяется длительностью ПСИ  $T$ . Чем меньше длительность ПСИ, тем чаще обновляется на БС информация о состоянии контролируемых объектов, а значит, более высокочастотные параметры можно контролировать. Существует большое количество приложений, в которых оперативность является ключевым параметром сети [2].

**Модель коллизий и метод расписания**

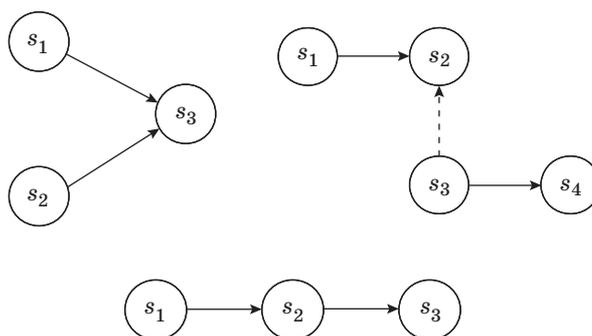
Сбор сообщений осложняется наличием помех, создаваемых одними передающими сенсорами другим. При этом одно или несколько сообщений могут оказаться искаженными, а передаваемая информация теряется. Такая ситуация называется *коллизией*, или *конфликтом*. В настоящей статье используется распространенная модель коллизий, рассмотренная, например, в работах [3, 4] и др.

В этих работах сеть описывается графом слышимости, узлы которого соответствуют сенсорам. Если пара сенсоров  $s_i$  и  $s_j$  находится друг от друга на расстоянии  $d_{i,j}$  меньше, чем дальность действия передатчика  $r$ , то пара соответствующих им узлов в графе соединяется ребром  $e_{i,j}$ . Обозначим граф слышимости как  $G = (S, E)$ , где  $S$  — множество сенсоров сети ( $|S| = N$ );  $E$  — множество ребер сети ( $E \subseteq S \times S$ ,  $e_{i,j} \in E$ , если  $d_{i,j} < r_{\text{прд}}$ ). Обозначим множество соседей сенсора  $s_i$  в графе  $G$  как  $C_i$ . В дальнейшем будем считать, что сообщения доставляются на БС по кратчайшему маршруту в графе  $G$ .

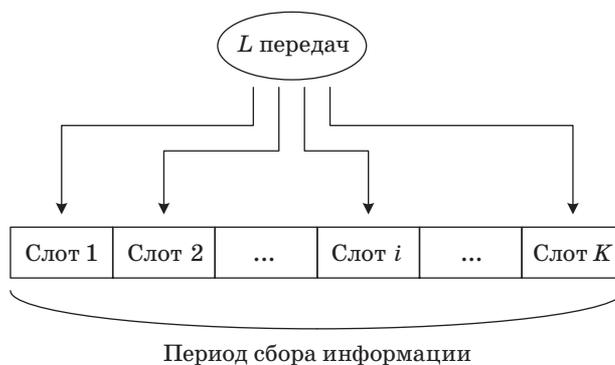
Для данной модели существует три типа коллизий (рис. 3):

- 1) некоторому сенсору пытаются одновременно передать сообщения два и более сенсоров;
- 2) сенсор, принимающий сообщение, находится в радиусе действия одного и более передатчиков других сенсоров, передающих сообщение не ему;
- 3) сенсору, осуществляющему передачу сообщения, пытается передать сообщение другой сенсор.

Достоинством данной модели является простота описания и возможность проведения теоре-



■ **Рис. 3.** Три вида коллизий  
 ■ **Fig. 3.** Types of collision



■ **Рис. 4.** Метод расписания  
 ■ **Fig. 4.** Scheduling approach

тического анализа, обобщаемого на случай более сложных моделей сети.

Существует два принципиально разных подхода борьбы с коллизиями. Первый подход получил название *случайный множественный доступ* [5], в то время как второй — *метод расписания* [6, 7]. В данной статье рассматривается метод расписания. При работе по расписанию ПСИ делится на *слоты* — отрезки времени, равные длительности передачи одного сообщения (считается, что все сообщения, формируемые сенсорами, имеют равную длительность). В каждом слоте сенсор может либо передавать сообщение, либо принимать сообщение, либо находиться в спящем режиме. Каждой из  $L$  передач назначается определенный слот. Назначение осуществляется таким образом, чтобы в  $i$ -м слоте ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) множество осуществляемых в нем передач  $p_i$  было бесконфликтным. Пусть длина расписания —

$$K \text{ слотов. Тогда } P = \bigcup_{i=1}^K p_i \text{ (рис. 4).}$$

Понятно, что может существовать множество бесконфликтных расписаний. Поиск конкретного расписания осуществляется на основе выбранного критерия.

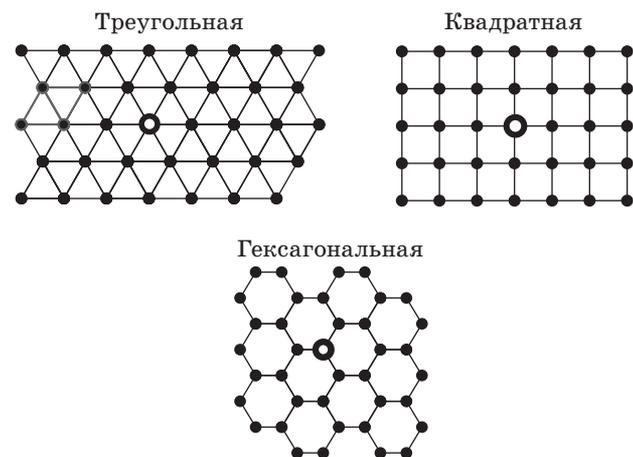
В данной работе основным критерием является минимизация величины  $K$ , длины расписания (или, что то же самое, периода сбора информации). Знание минимально возможной длительности ПСИ позволяет оценить способность сети выполнять возложенные на нее функции еще на этапе проектирования. Алгоритмом составления оптимального расписания будем называть алгоритм, позволяющий составить бесконфликтное расписание передач с минимально возможным числом слотов  $K$ . Очевидно, что  $K \geq N$ . Это следует из того, что за один слот БС не может принимать более одного сообщения (иначе возникнет коллизия).

### Составление расписания для сетей с топологией «правильная решетка»

Рассмотрим важный частный случай топологии сети — сеть типа «правильная двумерная решетка». Сети с данной топологией часто встречаются, например, в сельском хозяйстве [8]. Граф такой сети является планарным. Все ячейки решетки являются правильными многоугольниками с равным числом вершин. Узлами решетки являются сенсоры. Рассмотрим три возможных типа подобных решеток (рис. 5): решетки, ячейки которых являются 1) треугольниками (треугольные решетки), 2) четырехугольниками (квадратные решетки) и 3) шестиугольниками (гексагональные решетки).

**Теорема.** Для сети с топологией «правильная двумерная решетка» можно составить расписание длины  $N$  слотов.

Для доказательства теоремы введем некоторые вспомогательные определения и сформули-



■ **Рис. 5.** Треугольная, квадратная и гексагональная решетки: черные точки — сенсоры; черно-белые точки — БС

■ **Fig. 5.** Triangular, square and hexagonal lattice: black points — sensors; black-white point — base station

руем три алгоритма составления оптимального расписания для каждого из типов решетки.

**Определение 1.** Сенсор называется пассивным, если ни он, ни сенсоры, использующие его в качестве ретранслятора, не имеют сообщений для передачи. Иначе сенсор называется активным.

**Определение 2.** Активным графом называется подграф сети, образованный активными сенсорами и БС.

**Определение 3.** Псевдона начальным состоянием сенсорной сети называется такое состояние сети, когда каждый сенсор активного графа содержит не менее одного сообщения. Фактически это означает, что, если сеть находится в псевдона начальном состоянии, то сенсоры, не содержащие ни одного сообщения, можно исключить из рассмотрения, так как они в течение данного периода сбора не участвуют в работе сети ни как источники сообщений, ни как ретрансляторы.

### Треугольная решетка

Разделим сеть при помощи шести лучей на шесть подсетей и пронумеруем подсети, как показано на рис. 6. Сенсоры, расположенные на луче, отнесем к подсети, расположенной в направлении против часовой стрелки относительно луча. В каждой из подсетей содержится  $N/6$  сенсоров.

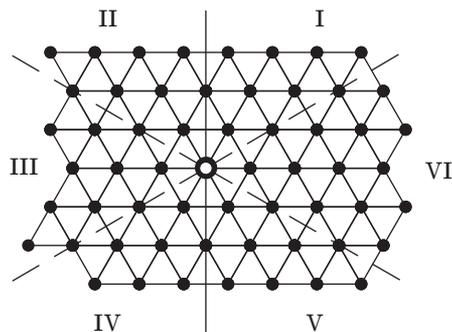
Опишем алгоритм составления оптимального расписания для сети с топологией типа симметричная треугольная решетка.

**Алгоритм 1.** Процесс составления расписания по алгоритму 1 состоит из последовательности итераций. Во время каждой итерации составляется расписание на шесть слотов. Причем в первых трех слотах итерации участвуют сенсоры, принадлежащие подсетям с нечетными номерами, в последних трех — подсетям с четными номерами.

Опишем действия, проводимые в ходе итерации.

1. Выбрать по одному наиболее удаленному сенсору в каждой из подсетей.

2. Проложить маршруты, соединяющие БС и выбранный сенсор.



■ **Рис. 6.** Разделение сети на шесть подсетей

■ **Fig. 6.** Division of a network into six subnetworks

3. Пронумеровать сенсоры на маршрутах, соединяющих БС и выбранные сенсоры, в порядке удаления от БС.

4. К подмножеству  $M_{i,s}$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, s = 0, 1, 2$ ) отнесем сенсоры маршрутов, принадлежащие  $i$ -й подсети и находящиеся на расстоянии  $s \bmod 3$  от БС.

5. В первом слоте передают сообщения сенсоры, принадлежащие подмножествам  $M_{1,1}, M_{3,2}, M_{5,0}$ ; во втором —  $M_{1,2}, M_{3,0}, M_{5,1}$ ; в третьем —  $M_{1,0}, M_{3,1}, M_{5,2}$ ; в четвертом —  $M_{2,1}, M_{4,2}, M_{6,0}$ ; в пятом —  $M_{2,2}, M_{4,0}, M_{6,1}$ ; в шестом —  $M_{2,0}, M_{4,1}, M_{6,2}$ .

*Замечание.* Маршрут, соединяющий БС и выбранный сенсор, должен быть проложен через сенсоры, принадлежащие той же подсети, что и выбранный сенсор.

Очевидно, что в каждом из слотов множество осуществляемых передач является бесконфликтным (это следует из того, что в каждом слоте у каждого принимающего сообщение сенсора есть только один передающий сообщение сосед). В каждом слоте итерации на БС поступает по одному сообщению (по одному из каждой участвующей подсети). Каждый сенсор на маршрутах передает одно сообщение и принимает одно сообщение, следовательно, в конце итерации сеть переходит в псевдоначальное состояние.

Тогда для сбора всех сообщений из сети потребуется  $N/6$  итераций. Значит, полная длительность периода сбора информации будет равна  $6N/6 = N$  слотов. То есть алгоритм 1 составляет оптимальное расписание для треугольной решетки.

### Квадратная решетка

Разделим сеть при помощи четырех лучей на четыре подсети (рис. 7, разделяющие лучи обозначены пунктирными линиями). Сенсоры, расположенные на луче, отнесем к подсети, расположенной в направлении против часовой стрелки относительно луча. В каждой из подсетей содержится  $N/4$  сенсоров.

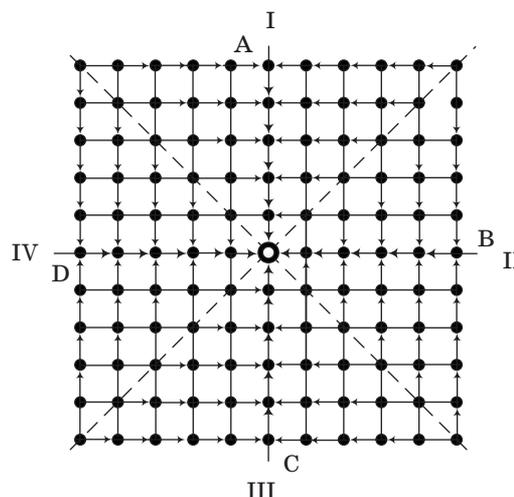
*Алгоритм 2.* Процесс составления расписания по алгоритму 2 состоит из последовательности итераций. Во время каждой итерации составляется расписание на четыре слота, причем в каждом из слотов передачи осуществляются в трех подсетях из четырех.

Опишем действия, осуществляемые в ходе итерации.

1. Выбрать по одному наиболее удаленному сенсору в каждой из четырех подсетей.

2. Пронумеровать сенсоры на маршрутах, соединяющих БС и выбранные сенсоры, в порядке удаления от БС.

3. К подмножеству  $M_{i,s}$  ( $i = 1, 2, 3, 4, s = 0, 1, 2$ ) отнесем сенсоры маршрутов, принадлежащие



■ **Рис. 7.** Разделение сети на четыре подсети  
 ■ **Fig. 7.** Division of a network into four subnetworks

$i$ -й подсети и находящиеся на расстоянии  $s \bmod 3$  от БС.

4. В первый слот итерации передают сообщения сенсоры, принадлежащие подмножествам  $M_{1,1}, M_{2,2}, M_{3,0}$ ; во второй —  $M_{2,1}, M_{3,2}, M_{4,0}$ ; в третий —  $M_{3,1}, M_{4,2}, M_{1,0}$ ; в четвертый —  $M_{4,1}, M_{1,2}, M_{2,0}$ .

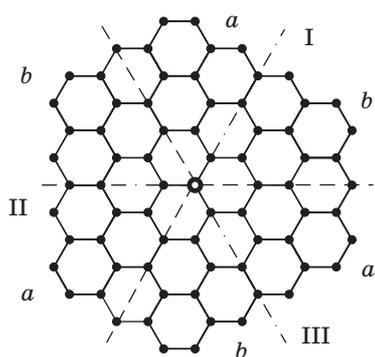
*Замечание.* Для того чтобы множество передач, осуществляемых в каждом слоте, было бесконфликтным, достаточно выполнения следующего правила составления маршрутов. Кратчайшие маршруты должны быть проложены через цепочки сенсоров, лежащих на лучах A, B, C и D (см. рис. 7, стрелками обозначены направления в маршрутах передачи сообщений). Отметим, что при таком подходе сенсоры, расположенные на разделяющих лучах, являются только источниками сообщений, но не участвуют в ретрансляции.

В каждый слот итерации на БС поступает по одному сообщению (по одному из каждой участвующей подсети). Каждый сенсор на маршруте передает одно сообщение и принимает одно сообщение, следовательно, в конце итерации сеть переходит в псевдоначальное состояние.

Тогда для сбора всех сообщений из сети потребуется  $N/4$  итераций. Значит, полная длительность периода сбора информации будет равна  $4N/4 = N$  слотов. То есть алгоритм 2 составляет оптимальное расписание для квадратной решетки.

### Гексагональная решетка

Разделим сеть при помощи трех лучей на три подсети (рис. 8, разделяющие лучи обозначены пунктирными линиями). Сенсоры, расположенные на луче, отнесем к подсети, расположенной



■ **Рис. 8.** Разделение сети на три подсети  
 ■ **Fig. 8.** Division of a network into three subnetworks

в направлении против часовой стрелки относительно луча. В каждой из подсетей содержится  $N/3$  сенсоров. Каждую из подсетей в свою очередь разделим на два сектора —  $a$  и  $b$  (границы раздела секторов изображены на рисунке штихпунктирными линиями).

Опишем алгоритм составления оптимального расписания для сети с этой топологией.

**Алгоритм 3.** Процесс составления расписания по алгоритму 3 состоит из последовательности итераций. Во время каждой итерации составляется расписание на три слота.

Опишем выполнение итерации.

1. Выбрать по одному наиболее удаленному сенсору из сектора  $a$  в каждой из подсетей, если итерация четная, и по одному наиболее удаленному сенсору из сектора  $b$  в каждой из подсетей, если итерация нечетная.

2. Пронумеровать сенсоры на маршрутах, соединяющих БС и выбранные сенсоры, в порядке удаления от БС.

3. К подмножеству  $M_{i,s}$  ( $i = 1, 2, 3, s = 0, 1, 2$ ) отнесем сенсоры, принадлежащие  $i$ -й подсети и находящиеся на расстоянии  $s \bmod 3$  от БС.

4. В первом слоте итерации передают сообщения сенсоры, принадлежащие подмножествам

$M_{0,1}, M_{1,2}, M_{2,3}$ ; во втором —  $M_{2,1}, M_{0,2}, M_{1,3}$ ; в третьем —  $M_{1,1}, M_{2,2}, M_{0,3}$ .

*Замечание.* Маршрут, соединяющий БС и выбранный сенсор, должен быть проложен через сенсоры, принадлежащие той же подсети и тому же сектору, что и выбранный сенсор.

В каждом слоте итерации на БС поступает по одному сообщению (по одному из каждой подсети). Каждый сенсор на маршруте передает одно сообщение и принимает одно сообщение, следовательно, в конце итерации сеть переходит в псевдона начальное состояние.

Тогда для сбора всех сообщений из сети потребуется  $N/3$  итераций. Следовательно, полная длительность цикла опроса равна  $3N/3 = N$  слотов. Таким образом, алгоритм 3 составляет оптимальное расписание для гексагональной решетки.

## Заключение

В данной работе был рассмотрен класс сенсорных сетей с топологией «правильная двумерная решетка». Для каждого типа сетей, принадлежащего этому классу, сформулирован алгоритм составления оптимального бесконфликтного расписания передач. Выяснилось, что для сети, содержащей  $N$  сенсоров, возможно организовать период сбора информации длительностью  $N$  слотов.

Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации сенсорных сетей, а также при разработке и анализе протоколов их функционирования. Особенно актуальными предложенные подходы являются в области сетей со сбором электромагнитной энергии [9, 10]. Дальнейшим развитием работы может стать анализ работы подобных сетей при случайном механизме генерации пакетов на узлах [11].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00197 мол\_а.

## Литература

1. **Sohraby K., Minoli D., Znati T.** Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications. — John Wiley & Sons, 2007. — 328 p.
2. **Rashid B., Rehmani M. H.** Applications of Wireless Sensor Networks for Urban Areas: A Survey // Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. P. 192–219. doi:10.1016/j.jnca.2015.09.008
3. **Chlamtac I., Kutten S.** Tree-based Broadcasting in Multihop Radio Networks // IEEE Transactions on Computers. 1987. N 10. P. 1209–1223. doi:10.1109/TC.1987.1676861

4. **Zhang Y., Gandham S., Huang Q.** Distributed Minimal Time Convergecast Scheduling for Small or Sparse Data Sources // 28th IEEE Intern. Real-Time Systems Symp. RTSS 2007. IEEE, 2007. P. 301–310. doi:10.1109/RTSS.2007.13
5. **Марковский С. Г., Тюрликов А. М.** Использование идентификаторов абонентов для резервирования канала множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 2. С. 28–35.
6. **Renner C., Turau V., Weyer C.** Performance of Energy-Efficient TDMA Schemes in Data-Gathering Scenarios with Periodic Sources // Networked Sensing Systems (INSS): Seventh Intern. Conf. IEEE, 2010. P. 187–194. doi:10.1109/INSS.2010.5573141

7. Doudou M., et al. Synchronous Contention-based MAC Protocols for Delay-Sensitive Wireless Sensor Networks: A Review and Taxonomy // *Journal of Network and Computer Applications*. 2014. Vol. 38. P. 172–184. doi:10.1016/j.jnca.2013.03.012
8. Yu X., et al. A Survey on Wireless Sensor Network Infrastructure for Agriculture // *Computer Standards & Interfaces*. 2013. Vol. 35. N 1. P. 59–64. doi:10.1016/j.csi.2012.05.001
9. Bakin E. A., Turlikov A. M., Ivanov I. S., Shelest M. N. Analysis of Energy Harvesting Efficiency for Power Supply of WBAN Nodes in Heterogeneous Scenarios // *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2016: 8th Intern. Congress. IEEE, 2016. P. 111–118. doi:10.1109/ICUMT.2016.7765342
10. Monir Rabby M. K., et al. A Scheduling Scheme for Efficient Wireless Charging of Sensor Nodes in WBAN // *Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE)*, 2017: IEEE/ACM Intern. Conf. IEEE, 2017. P. 31–36. doi:10.1109/CHASE.2017.56
11. Bakin E. A., Evseev G. S. Scheduling Algorithms for Tree-Based Convergecast Networks with a Random Number of Messages // *Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY)*, 2014: XIV Intern. Symp. IEEE, 2014. P. 19–22. doi:10.1109/RED.2014.7016696

UDC 004.75

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.107

**Algorithms of Convergecast Schedule Calculation for a Sensor Network Model with Regular Grid Topology**Bakin E. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, jenyb@mail.ruEvseev G. S.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, egs@vu.spb.ruSmirnov K. N.<sup>a</sup>, Assistant Professor, kossmir@gmail.com<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** In recent years, a new approach of information gathering has appeared in the area of distributed measuring systems, known as wireless sensor networks. This technique is very promising, but its efficient use in real applications requires developing special schemes of information message transmission which would prevent possible collisions. **Purpose:** Developing algorithms for wireless sensor networks with a 2D lattice topologies which would provide the shortest time of data gathering. **Results:** For wireless sensor networks with «all-to-one» logical structure and the topology of a triangular, rectangular or hexagonal grid, a group of collision-free time-optimal algorithms have been proposed (N slots for a network containing N sensors). The obtained algorithms have polynomial complexity and can be implemented in modern hardware. **Practical relevance:** The results of the research can be used by the developers of distributed data gathering systems based on wireless sensor networks for the development of new communication protocols.

**Keywords** — Sensor Network, Data Gathering, Collisions, Convergecast Scheduling.

**References**

1. Sohraby K., Minoli D., Znati T. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons, 2007. 328 p.
2. Rashid B., Rehmani M. H. Applications of Wireless Sensor Networks for Urban Areas: A Survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, vol. 60, pp. 192–219. doi:10.1016/j.jnca.2015.09.008
3. Chlamtac I., Kutten S. Tree-based Broadcasting in Multi-hop Radio Networks. *IEEE Transactions on Computers*, 1987, no. 10, pp. 1209–1223. doi:10.1109/TC.1987.1676861
4. Zhang Y., Gandham S., Huang Q. Distributed Minimal Time Convergecast Scheduling for Small or Sparse Data Sources. *28th IEEE Intern. Real-Time Systems Symp.*, IEEE, 2007, pp. 301–310. doi:10.1109/RTSS.2007.13
5. Markovskij S. G., Tyurlikov A. M. Using Subscriber Identifiers for Multiple Access Channel Reservation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2008, no. 2, pp. 28–35 (In Russian).
6. Renner C., Turau V., Weyer C. Performance of Energy-Efficient TDMA Schemes in Data-Gathering Scenarios with Periodic Sources. *Seventh Intern. Conf. "Networked Sensing Systems" (INSS)*, IEEE, 2010, pp. 187–194. doi:10.1109/INSS.2010.5573141
7. Doudou M., et al. Synchronous Contention-based MAC Protocols for Delay-Sensitive Wireless Sensor Networks: A Review and Taxonomy. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, vol. 38, pp. 172–184. doi:10.1016/j.jnca.2013.03.012
8. Yu X., et al. A Survey on Wireless Sensor Network Infrastructure for Agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 2013, vol. 35, no. 1, pp. 59–64. doi:10.1016/j.csi.2012.05.001
9. Bakin E. A., Turlikov A. M., Ivanov I. S., Shelest M. N. Analysis of Energy Harvesting Efficiency for Power Supply of WBAN Nodes in Heterogeneous Scenarios. *8th Intern. Congress "Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops" (ICUMT)*, IEEE, 2016, pp. 111–118. doi:10.1109/ICUMT.2016.7765342
10. Monir Rabby M. K., et al. A Scheduling Scheme for Efficient Wireless Charging of Sensor Nodes in WBAN. *IEEE/ACM Intern. Conf. "Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies" (CHASE)*, IEEE, 2017, pp. 31–36. doi:10.1109/CHASE.2017.56
11. Bakin E. A., Evseev G. S. Scheduling Algorithms for Tree-Based Convergecast Networks with a Random Number of Messages. *XIV Intern. Symp. "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY)*, IEEE, 2014, pp. 19–22. doi:10.1109/RED.2014.7016696

# ПРИБРЕТЕНИЕ ЗНАНИЙ В СОЦИОКИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ В ПРОЦЕССЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕСУРСОВ

А. В. Смирнов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

Т. В. Левашова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** социокиберфизические системы естественным образом объединяют машины и человека, что делает эти системы привлекательными для исследований, связанных с направлениями, входящими в область управления знаниями. Это объясняется тем, что именно человек благодаря своему интеллекту способен к незапрограммированному реагированию на ситуации за счет использования имеющихся у него знаний. **Цель:** исследование сценариев информационного взаимодействия ресурсов социокиберфизических систем при достижении этими ресурсами общих целей, в результате чего ресурсы (физические, кибернетические и социальные элементы систем, которые связаны в общую сеть) приобретают новые знания. **Результаты:** описаны сценарии взаимодействия, в которых кибернетические ресурсы приобретают знания из онтологии, друг от друга и от человека. Онтология служит моделью, обеспечивающей понимание ресурсами друг друга. Представлена метаонтология социокиберфизической системы, которая конкретизирована применительно к предложенным сценариям. В качестве средства, поддерживающего информационное взаимодействие ресурсов, используется интернет-сообщество — виртуальное сообщество, участники которого объединяются для взаимодействия через сеть Интернет на основе общих интересов. Приводится пример формирования текстовых сообщений, отправляемых ресурсами системы в интернет-сообщество. **Практическая значимость:** рассмотренные сценарии информационного взаимодействия вносят вклад в развитие инновационных систем производства продукции, услуг или процессов, нацеленных на получение выгоды посредством приобретения знаний.

**Ключевые слова** — социокиберфизическая система, онтология, интернет-сообщество, робототехническая сборка изделий.

## Введение

В последние годы широкое развитие получили исследования, связанные с новой моделью экономики (экономика знаний) и 4-й промышленной революцией (Industry 4.0, Logistics 4.0 и Mobility 4.0), что обусловлено, в первую очередь, появлением киберфизических систем. Это принципиально новый класс сложных систем, развитие которых требует создания новых подходов, моделей, методов и технологий.

Киберфизические системы тесно интегрируют физические и вычислительные среды на основе их информационного взаимодействия в режиме реального времени [1]. Эти системы основаны на инфраструктурах, обеспечивающих связь, вычисления и управление и состоящих из нескольких уровней как в физической, так и в вычислительной системах. Такие системы открывают перспективы предоставления новых типов информационных сервисов, использующих возможности физических систем, связанных с предоставлением контекстной информации ранее недостижимого качества.

Термин «киберфизические системы» весьма близок по смыслу к набирающей популярность концепции «Интернет вещей» (Internet of Things). Европейский исследовательский кластер в области Интернета вещей (The European Research

Cluster on the Internet of Thing) определяет эту область исследований как динамическую глобальную сетевую инфраструктуру, способную к самонастройке на основе стандартных и поддерживающих интероперабельность протоколов. В этой инфраструктуре физические и виртуальные вещи имеют идентификаторы, физические свойства (атрибуты) и виртуальные персоналии, используют интеллектуальные интерфейсы и легко интегрируются в информационную сеть [2].

В реальности Интернет состоит не только из вещей, а также из онлайн-сервисов, потоков данных и людей, что привело к появлению концепции «Интернет всего» (Internet of Everything). Интернет всего определен как комплексная самонастраивающаяся и адаптивная система сетей сенсоров и интеллектуальных объектов, назначением которой является связь всех вещей, включая привычные и промышленные объекты. Основное назначение технологии Интернета всего — сделать вещи умными, программируемыми и более способными к взаимодействию с человеком [3]. Прогнозируют, что Интернет всего произведет революцию в большинстве видов взаимодействия людей. Наиболее сильно эта революция затронет здравоохранение, образование, работу, политику, экономику и развлечения [4].

Так же, как Интернет вещей движется в сторону концепции Интернета всего, киберфизические

системы перерастают в социокиберфизические системы (СКФС). С одной стороны, сращивание физического и информационного пространств в киберфизических системах сближает эти системы с концепцией Интернета вещей. В то же время анализ современных подходов и технологий, направленных на поддержку эффективной работы киберфизических систем, показал, что, помимо взаимодействия между кибернетическими и физическими мирами, эти системы интенсивно взаимодействуют с человеком [5]. Следовательно, подобные системы должны рассматриваться как сложные социотехнические среды, в которых человек и техника «взаимно переплетены» [6]. Включение человека в систему повышает интеллектуальность этой системы. В частности, человек может представлять и обрабатывать данные, распознавать ситуации, принимать решения, решать задачи, обучать кибернетические объекты и т. п.

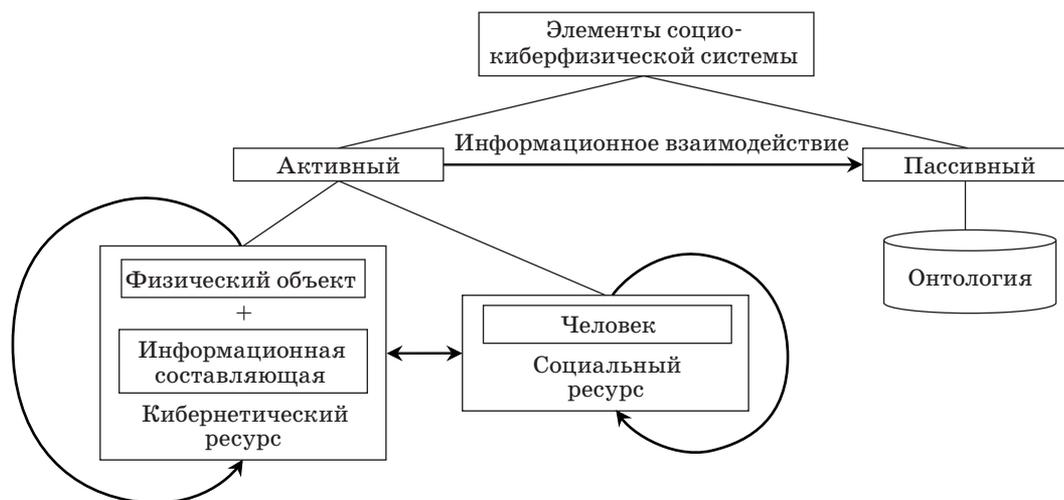
В данной работе рассматривается одна из проблем, которая может быть эффективно решена за счет вовлечения человека, — приобретение знаний в СКФС. Именно благодаря присутствию в СКФС людей появляется возможность получения принципиально нового знания, т. е. знания, которое не только не было занесено ранее в базу знаний СКФС и не было известно ее ресурсам, а новоизобретенного знания.

### Процессы информационного взаимодействия ресурсов социокиберфизической системы

Приобретение знаний — это процесс обогащения знаний некоторого объекта новыми знаниями. Таким объектом может быть программный

агент, информационная система, человек и т. п. В данной работе объектами, приобретающими знания, являются ресурсы СКФС. Концепция СКФС предполагает интеграцию физического, кибернетического и социального пространств [7]. Физическое пространство состоит из различных информационно-вычислительных физических устройств. Эти устройства, объединенные на основе процессов передачи информации, образуют кибернетическое пространство. Социальное пространство представлено людьми с их знаниями, ментальными способностями и социокультурными элементами. Все три пространства тесно взаимосвязаны. Кибернетическое пространство обменивается информацией с физическим пространством (физическими устройствами) и социальным пространством (людьми). Перечисленные пространства представлены множествами образующих их ресурсов (физических объектов с информационно-вычислительной составляющей и людей).

Информационное взаимодействие физического, кибернетического и социального пространств СКФС осуществляется посредством взаимодействия ресурсов, образующих эти пространства. Поскольку физические ресурсы не могут взаимодействовать без поддержки со стороны информационных технологий, в данной работе информационные ресурсы и физические ресурсы с информационной составляющей объединены в категорию кибернетических ресурсов. Таким образом, выделяются кибернетические и социальные ресурсы как ресурсы, обладающие способностями к взаимодействию (рис. 1). Оба типа ресурсов могут взаимодействовать между собой и с ресурсами другого типа. При этом кибернетические и социальные ресурсы являются актив-

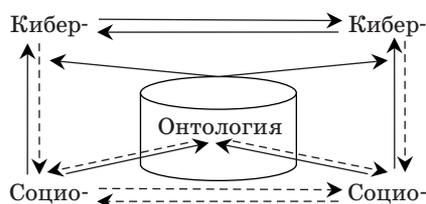


■ Рис. 1. Концептуальная модель социокиберфизической системы  
 ■ Fig. 1. Conceptual framework of socio-cyber-physical system

ными ресурсами, которые могут инициировать взаимодействие, что показано на рисунке двунаправленной стрелкой.

Помимо кибернетических и социальных ресурсов, СКФС включает в себя онтологию, которая служит для представления знаний проблемной области, в которой функционирует СКФС, и предоставляет словарь для информационного взаимодействия ресурсов. Она участвует во взаимодействии как пассивный элемент — посредством запросов со стороны активных элементов (кибернетических и социальных ресурсов). На рисунке взаимодействие с пассивным элементом обозначено однонаправленными стрелками.

Возможные процессы информационного взаимодействия между ресурсами СКФС показаны на рис. 2. Процессы, которые рассматриваются в данной работе, выделены сплошными стрелками; процессы, помеченные пунктирными стрелками, не рассматриваются. Кибернетические ресурсы могут обмениваться информацией друг с другом и с ресурсами социального пространства. При этом считается, что кибернетические ресурсы могут приобретать знания друг от друга и от социальных ресурсов, а социальные ресурсы могут приобретать знания только друг от друга. Также кибернетические ресурсы могут посылать запросы к онтологии и получать из нее знания. Вносить знания в онтологию разрешается только экспертам, т. е. только ресурсам социального



■ **Рис. 2.** Информационное взаимодействие ресурсов СКФС

■ **Fig. 2.** Information interactions of resources in socio-cyber-physical system

- Методы приобретения знаний в зависимости от видов взаимодействующих ресурсов
- Methods of knowledge acquisition depending on kinds of interacting resources

Ресурс, предоставляющий знания	Ресурс, приобретающий знания		
	Кибернетический	Социальный	Онтология
Кибернетический	1, 2, 3	Не рассматривается	Не рассматривается
Социальный	1, 2, 3		3
Онтология	1, 2		Не рассматривается

пространства. Хотя ресурсы социального пространства могут приобретать новые знания в ходе обмена информацией друг с другом, этот процесс относится к социальной сфере и в данной работе не рассматривается. Также не рассматривается процедура приобретения знаний ресурсами социального пространства из онтологии.

В работе выделены следующие методы приобретения знаний: 1) простое запоминание; 2) интеграция знаний; 3) логический вывод. Они являются основными методами, которые используются в любых методах приобретения знаний (интервьюирование, эксперимент, логическое доказательство).

*Простое запоминание* является результатом взаимодействия ресурсов, при котором один ресурс передает второму свои знания и второй ресурс добавляет полученные знания в свою базу знаний. Полученное знание может оказаться «недостающим» знанием, которое не было ранее специфицировано в базе знаний, или принципиально новым знанием.

*Интеграция знаний* возникает, когда уже существующие знания одного из ресурсов — участника взаимодействия — объединяются со знаниями, полученными этим ресурсом от другого участника. В отличие от предыдущего метода, здесь в результате объединения имеющихся и приобретенных знаний получается новое знание, которым ранее не обладал ни один из ресурсов, принимающих участие во взаимодействии [8].

*Логический вывод* возможен, если знания ресурса, приобретающего знания, представлены при помощи онтологии, основанной на логическом формализме. В частности, наиболее широко распространенный в настоящее время язык представления онтологий OWL (Web Ontology Language) [9], рекомендованный Семантическим Web, основан на дескрипционной логике. Логически выведенное знание является следствием интеграции знаний.

В СКФС перечисленные выше методы приобретения знаний используются в процессах информационного обмена между различными видами ресурсов (таблица).

В основе всех видов информационного воздействия лежит онтология.

### Онтология социокиберфизической системы

Как отмечалось, проблема понимания ресурсами друг друга решается за счет использования ими общей онтологии. В данной работе представлена метаонтология СКФС (рис. 3). Предполагается, что эта онтология конкретизируется применительно к определенной проблемной области, в которую интегрируется СКФС. На рисунке затененные концепты являются



■ Рис. 3. Метаонтология СКФС

■ Fig. 3. Core ontology of socio-cyber-physical system

экземплярами концепта Thing — самого общего концепта онтологии, экземплярами которого являются все концепты онтологии. Сам концепт Thing не представлен, чтобы не загромождать иллюстрацию.

В метаонтологии СКФС физическое, кибернетическое и социальное пространства представлены образующими их ресурсами. Эти ресурсы выполняют определенные функции в соответствии с текущими целями и ролями этих ресурсов.

Под целью понимается задача, которую требуется решить, или ситуация, которая должна быть достигнута. Цель определяется текущей ситуацией, сложившейся в СКФС. Текущая ситуация — это совокупность всех сведений о структуре СКФС и ее функционировании в данный момент времени. Индикатором изменения ситуации является наступление некоторого события. Цель определяет мотивацию взаимодействия ресурсов. Цель достигается вследствие выполнения ресурсами определенных функций. Функция — это действие, присущее роли. Функции, которые ресурс выполняет в текущей ситуации, определяются выполняемой этим ресурсом ролью. Функцией может быть вычислительная процедура и некоторое физическое действие (поднять предмет, включить свет и т. п.).

Для взаимодействия ресурсы используют информационный канал. В данной работе в качестве информационного канала используется интернет-сообщество, т. е. виртуальное сообщество, участники которого взаимодействуют через сеть Интернет. В настоящее время общение через Интернет для людей является обычной практикой. В отличие от социальных сетей, интернет-сообщество объединяет людей на основе общих интересов или целей. Так как СКФС предполагает интеграцию физического, кибернетического и со-

циального пространств для решения конкретных задач, общность целей явилась ключевым фактором, который обусловил выбор концепции интернет-сообщества для организации информационного взаимодействия между ресурсами СКФС. Помимо общности целей интернет-сообщество предоставляет следующие преимущества:

- поддерживается обмен информацией в реальном времени;
- отсутствует проблема распознавания многомодальной информации;
- текстовые сообщения, в отличие, например, от голосовых или жестовых, явно специфицируют знания;
- текстовые сообщения могут быть проанализированы с помощью множества компьютерных средств;
- возможно применение шаблонов для обмена сообщениями на основе онтологии СКФС, что позволяет избежать использования сложных алгоритмов анализа текста сообщения.

В интернет-сообществе у ресурсов есть своя роль (например, отправитель сообщения, получатель сообщения, администратор и т. п.), которая отличается от роли, играемой этими ресурсами в СКФС (например, источник информации, менеджер, исполнитель и т. п.). В процессе выполнения сценариев СКФС у одного и того же ресурса роли могут меняться.

### Сценарии взаимодействия ресурсов СКФС

В данном разделе рассматриваются сценарии взаимодействия ресурсов, в которых используются методы приобретения знаний, представленные в таблице. В качестве проблемной области выбрана робототехническая сборка изделий. Кибернетические ресурсы в этой проблемной об-

ласти представлены роботами. Онтология проблемной области, используемая в сценариях, реализована на языке OWL средствами редактора онтологий Protégé [10].

#### Взаимодействие кибернетических ресурсов с онтологией

Рассматриваемый в данном подразделе сценарий демонстрирует приобретение знаний посредством использования метода простого запоминания. Сценарий не предполагает использование концепции интернет-сообществ. Кибернетические ресурсы, представленные роботами, взаимодействуют с онтологией посредством запросов, реализованных на языке SPARQL [11]. Данный язык позволяет строить запросы к знаниям, представленным в формате RDF и OWL.

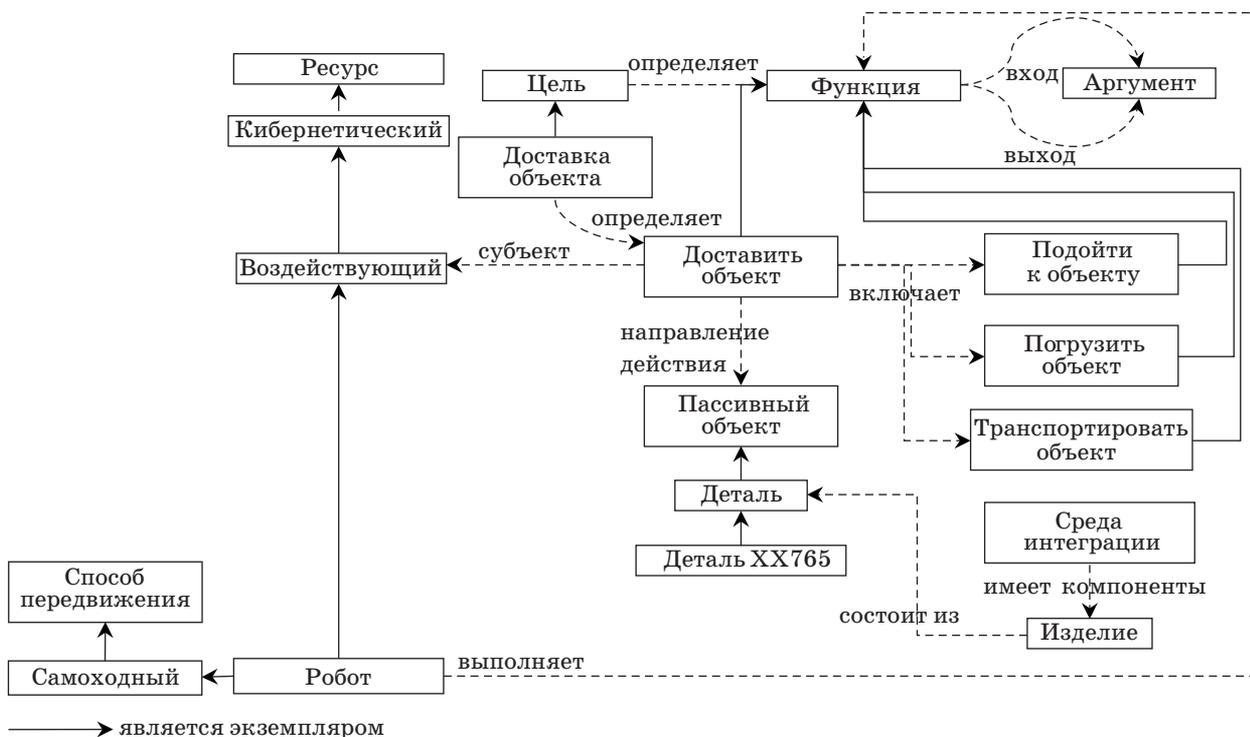
В сценарии предполагается, что ресурсу недостаточно имеющихся у него знаний для выполнения задания. Он пытается получить недостающие знания из онтологии, которая хранится удаленно и доступна через сеть Интернет. Проблема организации доступа к онтологии в работе не рассматривается. Ресурс взаимодействует с онтологией посредством отправки в нее запроса и получения ответа, в котором содержатся недостающие знания. Эти знания ресурс запоминает в своей базе знаний.

Предложенный сценарий демонстрируется на примере взаимодействия робота с онтологией при

выполнении задания, связанного с доставкой роботом детали для сборки. Фрагмент онтологии СКФС, представляющий знания, релевантные рассматриваемому сценарию, приведен на рис. 4. Для простоты понятие роли на рисунке опущено. Предполагается, что роль робота в рассматриваемом сценарии — «исполнитель».

В онтологии робот определен как самоходный кибернетический ресурс, который может воздействовать на объекты. Под воздействием понимается действие с применением силы, т. е. робот может перемещать объекты, толкать их и т. п. В качестве объекта воздействия робота рассматривается «Деталь ХХ765», которая является разновидностью понятия «Деталь», определенно в рассматриваемой проблемной области (среде функционирования СКФС).

Используя метаонтологию (см. рис. 3), задачи, возможные в среде функционирования СКФС, мы представили в виде подкатегорий концепта «функция». Сложные задачи декомпозированы на подзадачи и представлены простыми функциями. Функции описываются множеством входных и выходных аргументов. Рассматриваемые здесь функции не являются математическими (понятие функции в онтологии (см. рис. 3) предполагает выполнение вычислений или действий). Таким образом, в отличие от математической функции, которая может иметь только один выходной аргумент, рассматриваемые здесь функ-



■ Рис. 4. Фрагмент онтологии для задачи «Доставить объект»  
 ■ Fig. 4. Ontology fragment for the task «Deliver an object»

```
...
PREFIX assem: <http://www.semanticweb.org/tanya/ontologies/2017/0/assembly#>
SELECT DISTINCT ?Function
  WHERE {?Purpose owl:onProperty assem:determinesFunction.
        ?Purpose owl:someValuesFrom ?Function.
        assem:Доставка_объекта rdfs:subClassOf ?Purpose.}
```

- **Рис. 5.** Запрос на определение функций, обеспечивающих достижение цели «Доставка объекта»
- **Fig. 5.** Query to selection of the functions to be carried out to achieve the purpose of «Object delivery»

```
...
SELECT DISTINCT ?Functions
  WHERE {
    ?ClassFunctions owl:onProperty assem:includes.
    ?ClassFunctions owl:someValuesFrom ?Functions.
    assem:Доставить_объект rdfs:subClassOf ?ClassFunctions.
  }
```

- **Рис. 6.** Запрос функций, входящих в функцию «Доставить объект»
- **Fig. 6.** Query to selection of the functions being part of the function «Deliver an object»

ции не имеют ограничений на количество выходных аргументов.

Робот получает задание в форме запроса, суть которого заключается в том, что робот должен доставить деталь XX765 из точки *A* в точку *B*. В онтологии (см. рис. 4) задание соответствует цели. Так как на фрагменте, изображенном на рис. 4, не представлены аргументы функций, следует пояснить, что координаты точки *A* являются одним из входных аргументов функции «Подойти к объекту», точки *B* — одним из входных аргументов функции «Транспортировать объект». Задание формулируется в виде RDF-триплета  $\langle \textit{Subject}, \textit{Property}, \textit{Object} \rangle$ , что согласуется с представлением онтологии на языке OWL. В триплете *Subject* — доставка объекта, *Property* — направление действия, *Object* — деталь XX765.

Робот выполняет задание первый раз, и в его базе знаний нет плана выполнения полученного задания. Под планом выполнения понимается последовательность функций, которые робот должен реализовать, чтобы выполнить задание. Для того чтобы узнать, какие функции требуется реализовать, робот обращается в онтологию с запросом (рис. 5) на определение функций, связанных с целью задания отношением «определяет» (в онтологии это отношение представлено свойством *determinesFunction*). Запрос представлен на языке SPARQL с учетом особенностей реализации онтологии в редакторе онтологий Protégé. Результатом выполнения запроса является функция «Доставить объект».

Следующий запрос робота (рис. 6) направлен на выявление функций, входящих в функцию «Доставить объект», т. е. связанных с этой функцией отношением «включает» (в онтологии это отношение представлено свойством *includes*). Результатом выполнения запроса является список из трех функций: «Подойти к объекту», «Погрузить

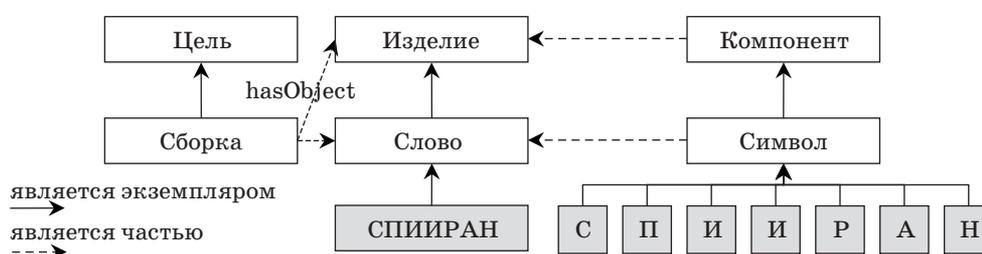
объект» и «Транспортировать объект». В общем случае эти функции, как и функция «Доставить объект», могут быть сложными, и робот должен выполнить серию запросов, чтобы выяснить все функции, требующие выполнения. Данный пример ограничен только функциями, представленными на рис. 4.

Порядок выполнения функций определяется роботом на основании анализа входных и выходных аргументов этих функций. В рассматриваемом примере вначале выполняется функция «Подойти к объекту», затем «Погрузить объект», последней выполняется функция «Транспортировать объект». Все функции будут конкретизированы применительно к детали XX765, которая в онтологии является разновидностью объекта, над которым выполняются перечисленные функции.

План выполнения задания «Доставить деталь XX765» записывается роботом в его базу знаний в форме онтологии, в которой явно прописана последовательность выполнения соответствующих функций. Последовательность функций задается при помощи шаблона проектирования онтологий (Ontology Design Pattern) для задания последовательностей — *sequence.owl* [12]. Этот шаблон определяет отношение предшествования через транзитивные и нетранзитивные свойства, а также инверсию. Шаблон может быть использован для моделирования последовательностей задач, процессов, временных интервалов, ситуаций и т. п.

### Взаимодействие кибернетических ресурсов друг с другом

Сценарий взаимодействия кибернетических ресурсов демонстрирует использование метода интеграции знаний. Сценарий предполагает сотрудничество роботов с одинаковой функциональностью. В сценарии участвуют два робота,



■ **Рис. 7.** Сборка слова «СПИИРАН» (фрагмент онтологии)

■ **Fig. 7.** Assembly of the word «SPIIRAN» (ontology fragment)

каждый из которых знает свою часть работы (свои функции) по сборке изделия и последовательность выполнения этих функций. В процессе сборки роботы обмениваются информацией о том, какую функцию каждый из них будет выполнять в данный момент времени. В результате у каждого робота накапливаются знания обо всех функциях, требующихся для сборки данного изделия, и о последовательности выполнения этих функций, т. е. о полном процессе сборки конкретного изделия, вследствие чего каждый робот может осуществлять процесс сборки самостоятельно и передавать приобретенные знания другим роботам.

Подробно сценарий взаимодействия кибернетических ресурсов описан на примере сборки двумя роботами слова из 3D-символов [13]. В приведенном в данной работе сценарии роботы для обмена сообщениями используют онтологию СКФС, специализированную для задачи сборки изделия, где изделием является слово «СПИИРАН» (рис. 7). Предложенный сценарий является упрощенным, в нем не учтены процессы синхронизации.

Согласно рассматриваемому сценарию все символы, представляющие буквы русского алфавита, разложены вдоль пути следования роботов. Каждый робот знает, какой символ он должен найти и перенести на заранее известное место. Эти знания представлены в онтологии робота в виде последовательности функций. Как только один из роботов находит соответствующий символ и доставляет его в надлежащее место, он отправляет сообщение в интернет-сообщество. В сообщении содержится информация о том, какой символ и в какое место перенесен. Второй робот, задействованный в том же процессе сборки, добавляет в свою онтологию эту информацию и объединяет ее с имеющейся. И так же, как и первый робот, он отправляет в интернет-сообщество информацию касательно своей части работы (тех символов, которые он нашел и перенес). В результате оба робота знают, какие символы требуется найти и куда их надо перенести, т. е. им становится известен весь процесс сборки.

Рассмотренный сценарий позволяет организовать кооперативную работу ресурсов СКФС. Так как оба робота знают всю процедуру сборки, они могут вместе участвовать в процессе сборки слова. Например, один из роботов находит любой из требующихся символов и сообщает об этом через интернет-сообщество другому роботу. Второму роботу становится известно, какой символ найден, и он может переносить следующий символ, например тот, который находится ближе к нему в данный момент.

#### Взаимодействие кибернетических и социальных ресурсов

Сценарий взаимодействия кибернетических и социальных ресурсов демонстрирует использование интернет-сообщества для информационного взаимодействия ресурсов. Сценарий предложен для ситуации, когда робот не знает, какую функцию он должен выполнять, чтобы справиться с заданием, и обращается за помощью к человеку.

Предлагаемый сценарий является разновидностью описанного выше сценария взаимодействия кибернетических ресурсов при сборке слова «СПИИРАН» с той разницей, что вторым участником сценария является человек. Согласно сценарию робот знает, какие символы он должен найти, но не знает, в какое место он должен их перенести. Он консультируется у человека, и человек сообщает роботу координаты требуемого местоположения найденного символа с учетом того, что результатом сборки является требуемое слово.

В сценарии для робота и человека отводятся следующие роли. В СКФС робот выполняет роль «исполнитель», а человек — «консультант». В интернет-сообществе робот играет роль получателя знаний, человек — поставщика знаний.

Сообщения в интернет-сообщество отправляются в следующем формате:

*<Type, Resource\_Send, Resource\_Recip, Product, Component, Service, Content, Status>*,

где *Type* — тип сообщения; *Resource\_Send* — имя отправителя сообщения; *Resource\_Recip* —

имя, идентификатор или роль получателя сообщения; *Product* — название изделия (экземпляр концепта *Product* в онтологии); *Component* — название компонента изделия (экземпляр концепта *Component* в онтологии); *Service* — выполняемая отправителем сообщения функция; *Content* — специфическая информация, связанная со значениями входных и выходных аргументов выполняемой функции; *Status* — статус выполнения задания (для статуса определено три значения: выполнено, отказ, приостановлено).

Ниже приводится пример сообщения робота применительно к сценарию сборки слова «СПИИРАН». В сообщении используются словари онтологии СКФС, специализированной для проблемной области роботизированной сборки [13], и онтологии сборки слова «СПИИРАН» (см. рис. 7). Предполагается, что робот нашел символ «Р» и запрашивает информацию о том, куда его переместить. Он отправляет сообщение в следующем виде:

*<Request, Robot1, Consultant, СПИИРАН, P, Character relocation, P, ?, ?, ?, Suspended>*,

где *Request* — тип сообщения (запрос); *Robot1* — имя робота-отправителя сообщения; *Consultant* — роль ресурса: консультант (сообщение предназначено для любого ресурса, выполняющего роль консультанта); *СПИИРАН* — название собираемого изделия; *P* — рассматриваемый компонент: символ «Р»; *Character relocation* — выполняемая функция: транспортировка символа; *Suspended* — статус выполнения функции: выполнение приостановлено. Поле *Content* представлено в виде «*P, ?, ?, ?*», означая, что компонент *P* является входным аргументом выполняемой функции и что робот запрашивает значения для выходных переменных этой функции (в онтологии выходные переменные соответствуют 3D-координатам местоположения).

Учитывая, что человек является ресурсом, выполняющим роль консультанта, приведенное выше сообщение преобразовывается в понятное человеку представление. Для преобразования используются упомянутые выше онтологии. Результат преобразования выглядит следующим образом.

Запрос к консультанту от робота Robot1: Робот Robot1 осуществляет сборку слова «СПИИРАН». Robot1 имеет дело с компонентом символ «Р». Robot1 выполняет функцию «Транспортировка символа». Robot1 спрашивает координаты *x*, *y*, *z* для символа «Р».

В соответствии со сценарием консультант в ответ на полученное сообщение должен выслать ответное (ответ (*Replay*)), в котором он сообщает значения координат для символа «Р». Для того чтобы сообщения человека были понятны роботу,

человек пользуется шаблонами ответов. Эти шаблоны разработаны на основе запросов. В рассматриваемом сценарии на запрос от робота Robot1 человек-консультант отвечает, используя следующую форму:

координата *x* для символа «Р» — значение,  
координата *y* для символа «Р» — значение,  
координата *z* для символа «Р» — значение,  
где значение — значение координаты, сообщаемое консультантом.

Рассматриваемый сценарий рассчитан на взаимодействие человека с проблемной областью и с выполняемыми роботами заданиями. При определении координат человек пользуется специальной процедурой. Он оценивает значение координаты *y*. Это значение задает прямую линию, вдоль которой производится сборка слова. Значение координаты *x* вычисляется следующим образом:

$$v_x = x_0 + (i - 1)w,$$

где  $x_0$  — значение координаты *x*, соответствующее местоположению первого символа собираемого слова (в рассматриваемом случае символа «С»); *i* — порядковое место символа в слове (в нашем случае 5-е место для символа «Р»); *w* — константа ( $w = 2w_l$ , где  $w_l$  — средняя ширина символов). Координата *z* в рассмотренном сценарии не учитывается, она введена в онтологии для случаев 3D-сборки.

Рассмотренный сценарий является примером взаимодействия кибернетических и социальных ресурсов, когда кибернетический ресурс обращается за помощью к человеку и получает от него недостающую информацию. Если этот ресурс обладает способностью запоминать получаемую информацию, то он записывает ее в свою базу знаний. В конкретном рассмотренном сценарии полученная информация будет представлена в виде индивида функции «Транспортировать объект», входными аргументами которой будут символ «Р» и координаты первоначального местоположения этого символа, а выходными аргументами — координаты, сообщенные роботу человеком. Хотя данный пример не является показательным с точки зрения дальнейшего использования приобретенных роботом знаний, он дает понимание, как осуществляется взаимодействие с человеком.

Одним из следствий сценария взаимодействия робота с человеком является то, что если робот получает от человека ранее неизвестные ему знания, то впоследствии он может пользоваться приобретенными знаниями и выполнять процедуру сборки конкретного изделия без участия человека, а также обмениваться своими знаниями с другими кибернетическими ресурсами. В рассмотренном сценарии таким знанием могла бы быть функция расчета координат.

### Логический вывод

Метод логического вывода демонстрируется на примере пополнения роботом имеющихся у него знаний. За основу взяты вышерассмотренные сценарии взаимодействия ресурсов в целях доставки объекта и сборки слова.

Задача «Сборка слова» представлена в онтологии робота в виде подкатегории концепта «цель». Цель достигается выполнением функций «Подойти к объекту», «Идентифицировать объект», «Погрузить объект», «Транспортировать объект», где объектами являются символы. Если для выполнения рассматриваемой задачи использовать робот, который ранее выполнял задачу доставки объекта (в рассматриваемых сценариях представлял деталь), и добавить в его онтологию представление задачи сборки изделия, где изделием является слово, то задача (или функция) «Доставить объект» будет автоматически классифицирована как подзадача задачи сборки изделия.

Здесь знанием, приобретенным в результате логического вывода, является знание о том, что задача сборки изделия включает в себя функцию «Доставить объект».

### Заключение

В работе предложены сценарии информационного взаимодействия ресурсов социкиберфизической системы в целях приобретения этими ресурсами знаний. Рассмотрены три метода приобретения знаний: простое запоминание, интеграция существующих знаний со знаниями, приобретенными в процессе взаимодействия, и логический вывод.

Показано, что проблема понимания разнородными ресурсами друг друга может быть решена за счет использования этими ресурсами общей онтологии. Описана метаонтология социкиберфизической системы, которая конкретизирована применительно к предложенным сценариям.

Предложено использовать концепцию интернет-сообществ для информационного взаимодействия ресурсов. Приведен пример формирования сообщений, отправляемых ресурсами в интернет-сообщество.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-29-04349, 17-07-00247 и 17-07-00248) и бюджетных тем № 0073-2014-0005 и 0073-2015-0007.

### Литература

1. **Antsaklis P.** Goals and Challenges in Cyber-Physical Systems Research // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2014. Vol. 59. N 9. P. 3117–3119. doi:10.1109/TAC.2014.2363897
2. Internet of Things / IoT European Research Cluster. [http://www.internet-of-things-research.eu/about\\_iiot.htm](http://www.internet-of-things-research.eu/about_iiot.htm) (дата обращения: 03.07.2017).
3. **J. Roberto Boisson de Marca.** Coming Next: The Internet of Everything / *President's Column of IEEE*. — 07.03.2014. <http://theinstitute.ieee.org/members/presidents-column/whats-coming-next-the-internet-of-everything> (дата обращения: 03.07.2017).
4. **Anderson J., Rainie L., Duggan M.** Digital Life in 2025: report. — Washington: Pew Research Center, 2014. — 61 p. <http://www.pewinternet.org/2014/03/11/digital-life-in-2025/> (дата обращения: 03.07.2017).
5. **Horvath I., Gerritsen B. H. M.** Cyber-Physical Systems: Concepts, Technologies and Implementation Principles // *Proc. of TMCE 2012*/ eds. by I. Horvath, Z. Rusak, A. Albers, M. Behrendt. 2012. P. 19–36.
6. **Agah A.** Human Interactions with Intelligent Systems: Research Taxonomy // *Computer and Electrical Engineering*. 2001. Vol. 27. P. 71–107. doi:https://doi.org/10.1016/S0045-7906(00)00009-4
7. **Liu Z., Yang D.-S., Wen D., Zhang W.-M., Mao W.** Cyber-physical-social Systems for Command and Con-

- trol // *IEEE Intelligent Systems*. July/August 2011. P. 92–96. doi:10.1109/MIS.2011.69
8. **Smirnov A., Levashova T., Shilov N.** Patterns for Context-based Knowledge Fusion in Decision Support // *Information Fusion*. 2015. Vol. 21. P. 114–129. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.inffus.2013.10.010
9. OWL Web Ontology Language Overview / W3C Recommendation; eds. by D. L. McGuinness, Frank van Harmelen. — 10 Feb. 2004. <https://www.w3.org/TR/owl-features/> (дата обращения: 03.07.2017).
10. Protégé: official Web-site. <http://protege.stanford.edu/> (дата обращения: 28.06.2017).
11. **Harris S., Seaborne A.** SPARQL 1.1 Query Language / W3C Recommendation. — 21 Mar. 2013. <http://www.w3.org/TR/sparql11-query> (дата обращения: 03.07.2017).
12. Sequence Pattern / Ontology Design Patterns. <http://www.ontologydesignpatterns.org/cp/owl/sequence.owl> (дата обращения: 19.07.2017).
13. **Smirnov A., Levashova T., Kashevnik A.** Ontology-based Cooperation in Cyber Physical Social Systems // *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems: Proc. of the 8th Intern. Conf.*, Aug. 28–31, 2017, Lyon, France. — Springer; *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2017. Vol. 10444. doi:10.1007/978-3-319-64635-0\_6

UDC 004.822:004.896:007.51  
doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.113

### Knowledge Acquisition in Socio-Cyber-Physical Systems through Information Exchange between Resources

Smirnov A. V.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, smir@iias.spb.su

Levashova T. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, tatiana.levashova@iias.spb.su

<sup>a</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Socio-cyber-physical systems naturally unite machines and humans. This fact makes such systems attractive for knowledge management research, as only humans, due to their intellect and knowledge, are capable of an unprogrammed response to situations. **Purpose:** Studying communicative interactions between the resources of socio-cyber-physical systems while these resources are jointly accomplishing their objectives. As a result of these interactions, the resources (physical, cybernetics and social elements of the systems interrelated into a network) acquire new knowledge. **Results:** Interaction scenarios have been described in which cyber-resources acquire knowledge from the ontology, from each other and from humans. The ontology serves as a model ensuring that the resources understand each other. A meta-ontology of a socio-cyber-physical system is proposed, specialized with respect to the suggested scenarios. Internet community is used as a tool supporting the communicative interactions. Internet community is a virtual community whose members unite on the base of common interests or goals to interact with each other primarily via the Internet. An example of forming text messages sent by the system resources to the Internet community is given. **Practical relevance:** The discussed scenarios of communicative interactions contribute to the development of innovative systems aiming at gaining benefit from knowledge acquisition.

**Keywords** — Socio-Cyber-Physical System, Ontology, Internet Community, Robotic Assembly.

#### References

1. Antsaklis P. Goals and Challenges in Cyber-Physical Systems Research. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, vol. 59, no. 9, pp. 3117–3119. doi:10.1109/TAC.2014.2363897
2. *Internet of Things, IoT European Research Cluster*. Available at: [http://www.internet-of-things-research.eu/about\\_iot.htm](http://www.internet-of-things-research.eu/about_iot.htm) (accessed 3 July 2017).
3. J. Roberto Boisson de Marca. *Coming Next: The Internet of Everything*. President's Column of IEEE, 7 March 2014. Available at: <http://theinstitute.ieee.org/members/presidents-column/whats-coming-next-the-internet-of-everything> (accessed 3 July 2017).
4. Anderson J., Rainie L., Duggan M. *Digital Life in 2025*. Report. Washington, Pew Research Center, 2014. 61 p. Available at: <http://www.pewinternet.org/2014/03/11/digital-life-in-2025/> (accessed 3 July 2017).
5. Horvath I., Gerritsen B. H. M. Cyber-Physical Systems: Concepts, Technologies and Implementation Principles. *Proc. of TMCE 2012*, I. Horvath, Z. Rusak, A. Albers, M. Behrendt (Eds.), 2012, pp. 19–36.
6. Agah A. Human Interactions with Intelligent Systems: Research Taxonomy. *Computer and Electrical Engineering*, 2001, vol. 27, pp. 71–107. doi:[https://doi.org/10.1016/S0045-7906\(00\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7906(00)00009-4)
7. Liu Z., Yang D.-S., Wen D., Zhang W.-M., Mao W. Cyber-Physical-Social Systems for Command and Control. *IEEE Intelligent Systems*, July/August 2011, pp. 92–96. doi:10.1109/MIS.2011.69
8. Smirnov A., Levashova T., Shilov N. Patterns for Context-based Knowledge Fusion in Decision Support. *Information Fusion*, 2015, vol. 21, pp. 114–129. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.inffus.2013.10.010>
9. *OWL Web Ontology Language Overview*. D. L. McGuinness, Frank van Harmelen (Eds.). W3C Recommendation, 10 Feb. 2004. Available at: <https://www.w3.org/TR/owl-features/> (accessed 3 July 2017).
10. *Protégé*. Official Web-site. Available at: <http://protege.stanford.edu/> (accessed 28 June 2017).
11. Harris S., Seaborne A. *SPARQL 1.1 Query Language*. W3C Recommendation, 21 March 2013. Available at: <http://www.w3.org/TR/sparql11-query> (accessed 3 July 2017).
12. *Sequence Pattern / Ontology Design Patterns*. Available at: <http://www.ontologydesignpatterns.org/cp/owl/sequence.owl> (accessed 19.07.2017).
13. Smirnov A., Levashova T., Kashevnik A. Ontology-based Cooperation in Cyber Physical Social Systems. *Proc. of the 8th Intern. Conf. "Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems"*, Springer, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2017, vol. 10444. doi:10.1007/978-3-319-64635-0\_6

# МЕДЛЕННАЯ ДИНАМИКА СТЕПЕНИ СИНХРОНИЗОВАННОСТИ КОНТУРОВ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ РИТМА СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

**В. В. Сказкина<sup>а</sup>**, магистрант

**Е. И. Боровкова<sup>а</sup>**, ассистент

**Д. Д. Кульминский<sup>а</sup>**, аспирант, ассистент

**А. А. Бутенко<sup>а</sup>**, ассистент

**Т. А. Галушко<sup>а</sup>**, студентка

**В. А. Шварц<sup>б</sup>**, канд. мед. наук

<sup>а</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет

им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, РФ

<sup>б</sup>Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии

им. А. Н. Бакулева Минздрава России, Москва, РФ

**Введение:** основной проблемой анализа низкочастотных составляющих биологических процессов является постановка специализированных экспериментов с длительной регистрацией сигналов, однако именно информация о поведении системы на длительных масштабах может внести неоценимый вклад в понимание характера взаимодействия отдельных элементов системы. **Цель:** анализ особенностей динамики предложенного количественного индекса, характеризующего степень фазовой синхронизации сложных нестационарных систем биологической природы — контуров вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы — на временных масштабах в десятки и сотни характерных периодов колебаний (сотни секунд) по длительным экспериментальным записям. **Результаты:** в ходе эксперимента были получены синхронные двухчасовые записи сигналов 23 здоровых испытуемых: фотоплетизмограммы и кардиоинтервалограммы. В скользящих окнах была оценена динамика суммарного процента фазовой синхронизации (индекс  $S$ ) 0,1 Гц колебаний в фотоплетизмограмме и кардиоинтервалограмме и мощности так называемых низкочастотных  $LF$  (с частотой 0,1 Гц) и высокочастотных  $HF$  (с частотой  $>0,1$  Гц) составляющих спектра исходных сигналов. Особенности взаимодействия изучаемых показателей были оценены методами корреляционного анализа. Обнаружены признаки колебательного характера динамики индекса  $S$  с характерным периодом колебаний около 1000 с и сложного нелинейного характера взаимодействия  $LF$ - и  $HF$ -колебаний в вегетативной регуляции кровообращения. Выявлен сложный нелинейный характер взаимодействия  $LF$ - и  $HF$ -колебаний в вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, определены признаки наличия осцилляций с периодом около 1000 с в зависимостях суммарного процента фазовой синхронизации 0,1 Гц контуров регуляции сердечно-сосудистой системы. Сформулирована структурная модель организации взаимодействия контуров регуляции сердечно-сосудистой системы, объясняющая наблюдающиеся эффекты. **Практическая значимость:** получение фундаментальных знаний об организации взаимодействия и регуляции элементов сердечно-сосудистой системы позволит усовершенствовать развиваемые нами методы диагностики и терапии патологических нарушений работы сердечно-сосудистой системы.

**Ключевые слова** — анализ данных, фазовая синхронизация, нелинейная динамика, статистический анализ, вегетативная регуляция, сердечно-сосудистая система.

## Введение

В наших предшествующих исследованиях было проведено изучение особенностей взаимодействия сложных нелинейных систем биологической природы методами нелинейной динамики. На основе полученных результатов был предложен новый показатель — суммарный процент фазовой синхронизации (индекс  $S$ ) — для оценки взаимодействия низкочастотных (0,1 Гц) механизмов вегетативной барорефлекторной регуляции кровообращения (в частности, ритма сердца и периферического кровенаполнения) [1]. Метод расчета индекса  $S$  сводится к количественной оценке фазовой синхронизации 0,1 Гц колебаний, выделяемых из синхронных записей (длительностью 10 мин) фотоплетизмограммы

(ФПГ) и кардиоинтервалограммы (КИГ) [1]. Было показано, что исследуемые низкочастотные колебания, характеризующие вегетативную регуляцию разных отделов сердечно-сосудистой системы (ССС), могут спорадически демонстрировать длительные участки фазовой синхронизации [1, 2]. Количественная оценка данных участков с помощью предложенного индекса  $S$  позволяет определить выраженность системной вегетативной дисфункции, что имеет важное клиническое значение [3–9].

Механизмы взаимодействия изучаемых низкочастотных колебательных процессов ( $LF$ -колебаний с частотой 0,1 Гц) в ССС являются перспективной областью исследований. Особый интерес вызывает наличие процессов с частотами  $< 0,1$  Гц в динамике регуляции сердца и сосудов. Данное

явление может быть следствием существенного влияния гуморальной системы регуляции (регуляция посредством гормонов) на функционирование вегетативной нервной системы [8].

Основной проблемой анализа низкочастотных составляющих биологических процессов является постановка специализированных экспериментов с достаточно длительной их регистрацией, что ограничивает возможности исследователей. Вместе с тем информация о поведении системы на данных длительных масштабах может внести неопределимый вклад в понимание характера взаимодействия отдельных ее элементов. В частности, анализ низкочастотных составляющих ССС на длительных записях показывает высокую диагностическую и прогностическую значимость, в том числе и в прогнозе смертности после инфаркта миокарда [9] и других клинических ситуациях [10].

Целью данного исследования является анализ динамики предложенного количественного индекса, характеризующего степень фазовой синхронизации контуров вегетативной регуляции ССС на временных масштабах в десятки и сотни характерных периодов колебаний (сотни секунд) по длительным экспериментальным записям.

### Получение исследовательского материала и методы анализа

В ходе экспериментальных исследований была осуществлена синхронная запись электрокардиограммы (ЭКГ) и ФПГ у 23 условно здоровых добровольцев (13 мужчин и 10 женщин) в возрасте от 19 до 21 года и обладающих средним уровнем физической активности.

Канал датчика ФПГ был помещен на дистальную фалангу указательного пальца правой руки. Регистрация сигнала ЭКГ осуществлялась в I стандартном отведении по Эйнтховену. Информация о вариабельности ритма сердца была получена из ЭКГ с помощью выделения КИГ [8]. Во время эксперимента испытуемый находился в положении лежа и дышал произвольно. Общая длительность записи для каждого испытуемого составила 120 мин.

Для анализа данных использовались как классические подходы спектрального и статистического анализа [8], так и развиваемые нами оригинальные методы, основанные на анализе динамики мгновенных фаз колебаний в КИГ и ФПГ [1].

Первым этапом анализа экспериментальных записей было определение зависимости длин участков синхронизации  $LF$ -составляющих КИГ и ФПГ от времени их начала  $H(t)$  для каждого человека. Также были рассчитаны автокорреляционные функции (АКФ) последовательностей  $H$  с лагом  $\tau$  в диапазоне  $[-2000, 2000]$  с.

Следующим этапом является анализ индивидуальной динамики  $LF$ - и  $HF$ -колебаний в вегетативной регуляции частоты сердечных сокращений и периферического кровообращения, а также исследование коллективной динамики  $LF$ -колебаний в КИГ и ФПГ. Для анализа индивидуальной динамики в скользящих окнах длительностью 5 мин со сдвигом 10 с проводилась количественная оценка динамики показателей мощностей спектров КИГ и ФПГ в  $HF$ - и  $LF$ -частотных диапазонах —  $\Delta f_{HF}$  и  $\Delta f_{LF}$  соответственно [11]. Были получены их зависимости от времени:  $LF_{КИГ}(t)$ ,  $HF_{КИГ}(t)$  и  $LF_{ФПГ}(t)$ ,  $HF_{ФПГ}(t)$ . Количественная оценка индекса фазовой синхронизации  $S$  между исследуемыми системами с помощью предложенного ранее метода проводилась также в скользящих окнах длиной 5 мин со сдвигом 10 с [1]. Таким образом формировалась зависимость индекса  $S$  от времени —  $S(t)$ .

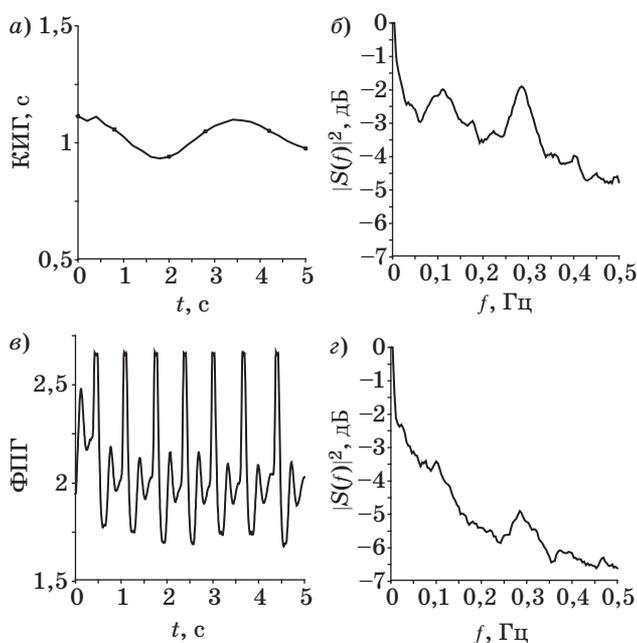
Для всех испытуемых проведен анализ взаимных корреляций между  $S(t)$  и каждой из зависимостей  $LF_{КИГ}(t)$ ,  $HF_{КИГ}(t)$ ,  $LF_{ФПГ}(t)$  и  $HF_{ФПГ}(t)$ :  $C_{LF-КИГ}(\tau)$ ,  $C_{HF-КИГ}(\tau)$ ,  $C_{LF-ФПГ}(\tau)$ ,  $C_{HF-ФПГ}(\tau)$  для лагов  $\tau$  в диапазоне  $[-2000, 2000]$  с.

Для исключения влияния на оцениваемую величину взаимных корреляционных функций при оценке коэффициентов на больших (относительно длины реализаций) лагах расчет  $C(\tau)$  осуществлялся независимо от значения  $\tau$  по участку реализации фиксированной длины 3000 с и сопровождался оценкой статистической значимости.

При этом проверялась нулевая статистическая гипотеза об отсутствии корреляции между исследуемыми сигналами. Для этого случайным образом формировались 500 пар суррогатных реализаций, в которых пары сигналов для расчета  $C(\tau)$  брались заведомо от разных людей, т. е. были априорно не связаны. При этом такие пары реализаций имеют близкие к оригинальным данным частотные характеристики, что может влиять на оцениваемую в окнах величину корреляции. Таким образом, опровержение статистической гипотезы говорит о том, что полученное значение корреляции определяется не длиной анализируемых участков реализаций и их спектральными характеристиками в данном окне, а выявленной связью. При проверке статистической гипотезы по полученным значениям суррогатных данных рассчитывался 95%-й полный уровень значимости, с которым сравнивались значения, полученные при обработке экспериментальных сигналов.

### Результаты анализа динамики суммарного процента фазовой синхронизации

На рис. 1 представлен типичный пример экспериментальных сигналов для добровольца А (рис. 1, а и в), а также их спектр в логарифми-



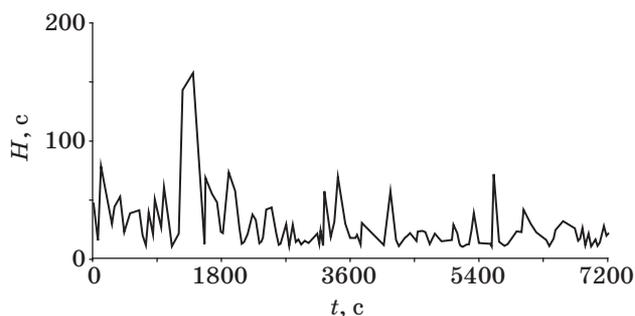
■ **Рис. 1.** Примеры типичных экспериментальных сигналов испытуемого А: а — КИГ; б — спектр КИГ в логарифмическом масштабе; в — ФПГ, снятое с пальца правой руки; г — спектр ФПГ в логарифмическом масштабе. Сигнал ФПГ приведен в безразмерных единицах

■ **Fig. 1.** The examples of typical experimental signals for the subject A: а — CIG; б — CIG spectrum on a logarithmic scale; в — right finger's PPG; г — PPG spectrum on a logarithmic scale. The PPG signal is given in dimensionless units

ческом масштабе (рис. 1, б и г). Стоит отметить, что различимые пики на рис. 1, б и г отображают воздействия вегетативной системы регуляции на деятельность ССС в *LF* (0,1 Гц) и *HF* (0,3 Гц) частотных диапазонах.

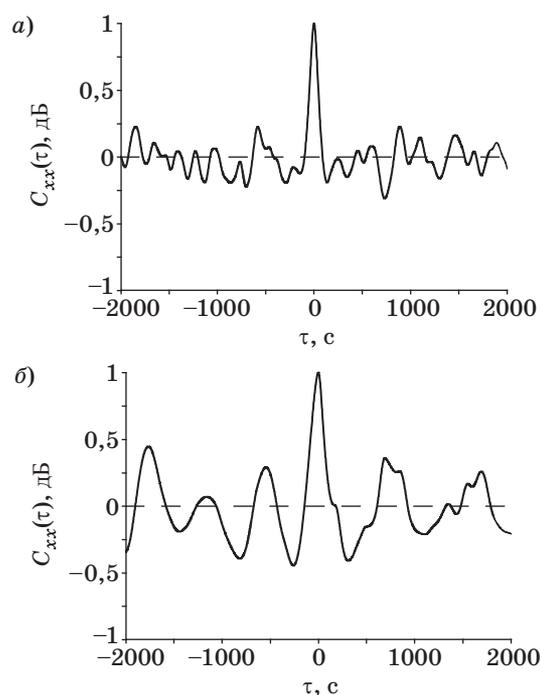
Пример рассчитанной зависимости  $H(t)$  длин участков синхронизации процессов регуляции сердечного ритма (КИГ) и тонуса сосудистых стенок артерий (ФПГ) от времени их начала показан на рис. 2. Важно отметить, что нередко встречаются длительные непрерывные участки синхронизации. Максимальный по экспериментальной выборке синхронный участок был зафиксирован длиной 155 с.

Для определения характера периодичности возникновения синхронизации между двумя исследуемыми процессами были построены АКФ полученных последовательностей  $H(t)$  (см. рис. 2) с лагом  $\tau$  в диапазоне  $[-2000, 2000]$  с. На рис. 3 представлены типичные примеры данных функций. Можно отметить, что часть испытуемых демонстрирует быстро спадающие АКФ (рис. 3, а), однако несколько записей позволяют наблюдать колебания АКФ с периодом колебаний около 1000 с (рис. 3, б).



■ **Рис. 2.** Последовательность длительностей синхронных участков  $H(t)$  для испытуемого А

■ **Fig. 2.** The sequence of durations of synchronous spans  $H(t)$  for subject A



■ **Рис. 3.** Пример АКФ последовательностей длин синхронных участков  $H(t)$  с лагом  $\tau$  в диапазоне  $[-2000, 2000]$  с: а — процесс с быстро спадающей корреляцией; б — процесс, демонстрирующий признаки наличия ритмической динамики

■ **Fig. 3.** An example of autocorrelation functions of sequences of synchronous span's durations  $H(t)$  with lag  $\tau$  in the range  $[-2000, 2000]$  seconds: а — a process with rapidly decreasing correlation; б — a process demonstrating signs of rhythmic dynamics

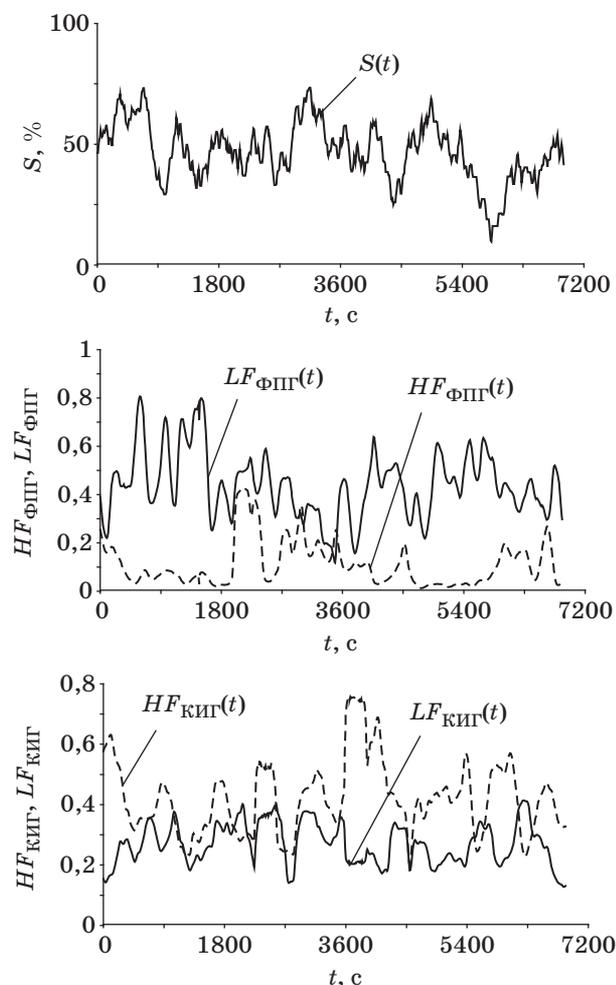
Рассчитанные для всех добровольцев значения индексов представлены в табл. 1.

Типичные зависимости суммарного процента  $S$  и спектральных характеристик от времени представлены на рис. 4. Важно отметить, что осцилляции с периодами около 1000 с, обнаруженные при построении АКФ последовательности длин

■ **Таблица 1.** Значения локального минимума (min) и максимума (max) спектральных плотностей мощности со стандартным отклонением (SD) их зависимостей от времени, усредненные по всей выборке испытуемых

■ **Table 1.** The values of the local minimum (min) and maximum (max) of the spectral power densities with the standard deviation (SD) of the time dependencies averaged over the entire sample subjects

Зависимость	min±SD	max±SD
$S(t)$	4,94±7,30	66,25±17,39
$LF_{КИГ}(t)$	0,16±0,07	0,58±0,09
$HF_{КИГ}(t)$	0,13±0,08	0,58±0,22
$LF_{ФПГ}(t)$	0,15±0,17	0,81±0,39
$HF_{ФПГ}(t)$	0,07±0,11	0,74±0,28



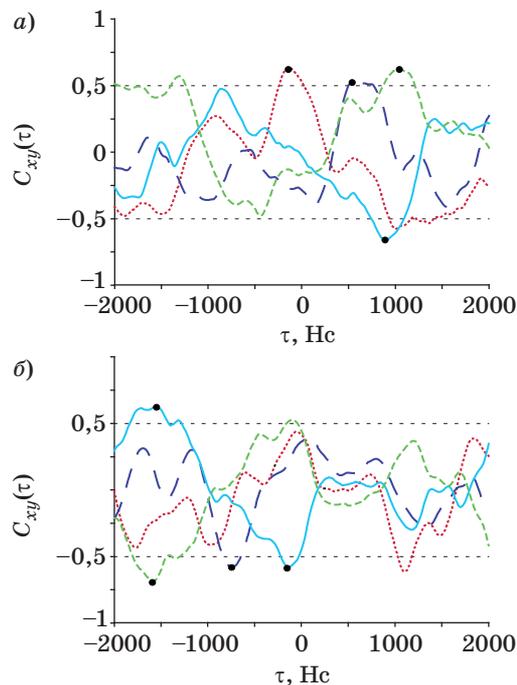
■ **Рис. 4.** Примеры зависимостей рассчитанных функций

■ **Fig. 4.** The examples of dependences of the calculated functions

синхронных участков, могут быть выделены при непосредственном визуальном анализе  $S(t)$ .

Для того чтобы ответить на вопрос, насколько высокоамплитудные модуляции величины  $S$  во времени определяются ритмами с частотой меньшей 0,1 Гц в  $LF$ - и  $HF$ -диапазонах, проводились исследования корреляций  $S(t)$  с  $LF_{КИГ}(t)$ ,  $HF_{КИГ}(t)$ ,  $LF_{ФПГ}(t)$  и  $HF_{ФПГ}(t)$ :  $C_{LF-КИГ}(\tau)$ ,  $C_{HF-КИГ}(\tau)$ ,  $C_{LF-ФПГ}(\tau)$  и  $C_{HF-ФПГ}(\tau)$ . Данное исследование является прямым продолжением нашей предшествующей работы по изучению низкочастотной динамики вегетативной системы [11]. Результат анализа взаимных корреляций представлен в табл. 2. Для каждого из испытуемых приводится максимальное (по модулю) значение корреляции, превышающее полный 95%-й статистический уровень значимости, и соответствующий этому значению лаг.

На рис. 5, а и б представлен результат расчета взаимных корреляционных функций  $C_{LF-КИГ}(\tau)$ ,



■ **Рис. 5.** Результат расчета взаимных корреляционных функций  $C(\tau)$  между  $S(t)$  с  $LF_{КИГ}(t)$  (длинный пунктир), с  $HF_{КИГ}(t)$  (точечная линия), с  $LF_{ФПГ}(t)$  (сплошная линия) и с  $HF_{ФПГ}(t)$  (короткий пунктир) для испытуемых № 7 (а) и 22 (б). Точками отмечены локальные максимумы кросскорреляционных функций (горизонтальная линия), превышающие 95% -й уровень значимости

■ **Fig. 5.** The result of the calculation of the mutual correlation functions  $C(\tau)$  between  $S(t)$  with  $LF_{КИГ}(t)$  (long dashed line), with  $HF_{КИГ}(t)$  (dotted line), with  $LF_{ФПГ}(t)$  (solid line) and with  $HF_{ФПГ}(t)$  (short dashed line) for subjects No. 7 (a) and No. 22 (b). Points indicate local maxima of cross-correlation functions that exceed the 95% significance level (horizontal line)

■ **Таблица 2.** Значение максимума (по модулю) взаимной корреляции, а также соответствующие значения лага  $\tau$  (статистически значимые значения выделены жирным шрифтом)

■ **Table 2.** The values of the maximum (modulo) of the cross-correlation, as well as the corresponding values of the lag  $\tau$  (statistically significant values are shown in bold)

Субъект	$C_{LF-КИГ}$	$\tau$ , с	$C_{HF-КИГ}$	$\tau$ , с	$C_{LF-ФПГ}$	$\tau$ , с	$C_{HF-ФПГ}$	$\tau$ , с
1	<b>-0,55</b>	<b>1540</b>	<b>-0,57</b>	<b>770</b>	-0,45	1430	<b>-0,59</b>	<b>240</b>
2	-0,47	810	<b>0,50</b>	<b>-1550</b>	<b>0,53</b>	<b>-60</b>	<b>-0,55</b>	<b>-1790</b>
3	<b>0,68</b>	<b>-1930</b>	<b>-0,57</b>	<b>-900</b>	-0,41	680	<b>0,61</b>	<b>430</b>
4	<b>0,57</b>	<b>-2000</b>	<b>-0,58</b>	<b>1840</b>	0,46	2000	<b>-0,53</b>	<b>2000</b>
5	<b>0,51</b>	<b>-1120</b>	<b>0,62</b>	<b>630</b>	0,46	-1910	<b>-0,63</b>	<b>-160</b>
6	<b>0,56</b>	<b>1010</b>	<b>0,52</b>	<b>-1420</b>	-0,40	-1140	-0,47	260
7	<b>0,54</b>	<b>550</b>	<b>0,63</b>	<b>-140</b>	<b>-0,66</b>	<b>900</b>	<b>0,63</b>	<b>1030</b>
8	<b>-0,50</b>	<b>-230</b>	<b>-0,53</b>	<b>-1180</b>	<b>-0,51</b>	<b>-1260</b>	-0,47	-940
9	-0,44	-30	0,45	1660	<b>0,52</b>	<b>1450</b>	<b>0,65</b>	<b>-1180</b>
10	<b>0,58</b>	<b>-660</b>	<b>0,58</b>	<b>-660</b>	<b>0,70</b>	<b>740</b>	0,45	1220
11	<b>0,64</b>	<b>820</b>	<b>0,56</b>	<b>-300</b>	<b>0,55</b>	<b>-720</b>	<b>-0,50</b>	<b>-680</b>
12	-0,49	-1710	<b>0,51</b>	<b>-880</b>	<b>0,63</b>	<b>-1550</b>	<b>-0,62</b>	<b>-1420</b>
13	<b>-0,69</b>	<b>1390</b>	<b>-0,55</b>	<b>-450</b>	<b>-0,56</b>	<b>-610</b>	<b>0,50</b>	<b>-550</b>
14	<b>0,52</b>	<b>-110</b>	<b>0,50</b>	<b>-130</b>	<b>-0,49</b>	<b>930</b>	<b>-0,49</b>	<b>1700</b>
15	<b>0,59</b>	<b>470</b>	<b>-0,54</b>	<b>470</b>	-0,38	640	-0,36	-420
16	<b>-0,75</b>	<b>1810</b>	<b>0,67</b>	<b>590</b>	<b>0,48</b>	<b>20</b>	-0,46	-1320
17	<b>0,74</b>	<b>-1860</b>	-0,42	-900	<b>0,50</b>	<b>-1940</b>	<b>-0,66</b>	<b>1480</b>
18	<b>0,56</b>	<b>50</b>	<b>-0,56</b>	<b>1050</b>	<b>0,60</b>	<b>-20</b>	<b>0,56</b>	<b>-970</b>
19	-0,44	610	<b>-0,57</b>	<b>180</b>	<b>0,83</b>	<b>150</b>	<b>-0,85</b>	<b>780</b>
20	<b>0,62</b>	<b>210</b>	-0,48	220	-0,47	2000	<b>0,52</b>	<b>2000</b>
21	0,36	30	-0,44	-560	<b>-0,58</b>	<b>1660</b>	<b>0,54</b>	<b>1680</b>
22	<b>-0,58</b>	<b>-740</b>	<b>-0,62</b>	<b>1100</b>	<b>0,62</b>	<b>-1550</b>	<b>-0,69</b>	<b>-1590</b>
23	0,46	-1750	<b>0,54</b>	<b>-1540</b>	-0,46	960	0,39	640

$C_{HF-КИГ}(\tau)$ ,  $C_{LF-ФПГ}(\tau)$  и  $C_{HF-ФПГ}(\tau)$  для испытуемых № 7 и 22.

Из табл. 2 видно, что максимумы корреляции часто оказываются существенно сдвинуты относительно нуля и наблюдаются при лагах в сотни секунд (см. рис. 5). Однако оценка средних значений лагов:  $(-47 \pm 293)$  с для  $C_{LF-КИГ}(\tau)$  (среднее с ошибкой оценки среднего),  $(-133 \pm 226)$  с для  $C_{HF-КИГ}(\tau)$ ,  $(-24 \pm 292)$  с для  $C_{LF-ФПГ}(\tau)$ ,  $(176 \pm 321)$  с для  $C_{HF-ФПГ}(\tau)$  — и достаточно равномерное распределение лагов, соответствующих максимумам, по диапазону перебираемых лагов затрудняют достоверную интерпретацию.

Интересно, что в пяти случаях (33 % для  $C_{LF-КИГ}(\tau)$  и 30 % для  $C_{LF-ФПГ}(\tau)$ ) наблюдались отрицательные корреляции  $S(t)$  с  $LF_{КИГ}(t)$  и  $S(t)$  с  $LF_{ФПГ}(t)$ , т. е. падение интенсивности колебаний в  $LF$ -диапазоне сопровождалось увеличением степени синхронизации  $S(t)$  (см. рис. 5). Также интересен сам факт наличия больших значимых корреляций обоих знаков суммарного процента фазовой синхронизации с колебаниями мощности КИГ и ФПГ в  $HF$ -диапазоне, который по построению не перекрывается по частоте с ритмами, используемыми для расчета  $S(t)$ .

### Обсуждение результатов исследования динамики суммарного процента фазовой синхронизации

Для исследований особенностей нелинейной динамики медленных ритмов сигналов ССС, имеющих важное значение для медицины [8], требуется регистрация многочасовых записей и использование специализированных методов обработки и анализа данных. Поэтому такие исследования являются нетривиальной задачей. Вместе с тем изучение этих медленных ритмов позволяет развить наши представления о внутреннем устройстве и организации взаимодействия сложных нелинейных контуров регуляции, обеспечивающих работу ССС человека.

В данной работе был проведен анализ двухчасовых записей ЭКГ и ФПГ условно здоровых людей. В ходе исследования были обнаружены признаки регулярности в колебаниях оценок степени фазовой синхронизации механизмов регуляции частоты сердечных сокращений и сосудистого тонуса во времени — наблюдались колебания зависимости от времени предложенного ранее индекса суммарного процента фазовой синхронизации

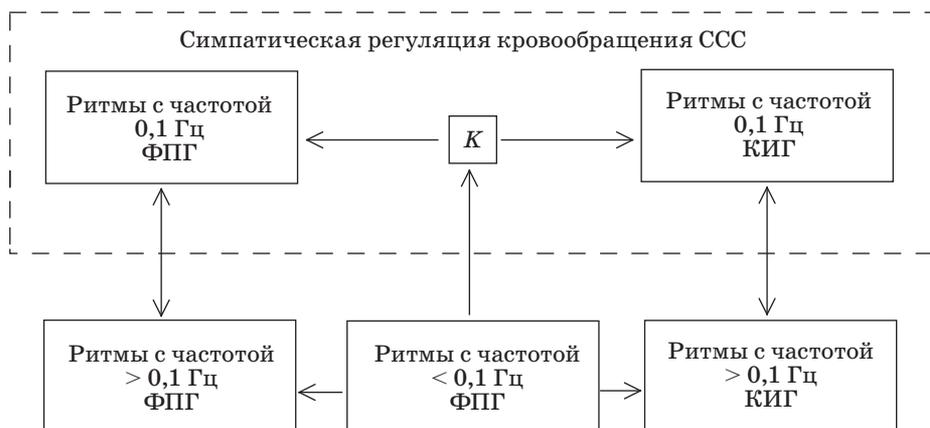
$S(t)$ . Характерный период этих колебаний может быть оценен даже при визуальном анализе зависимостей  $S(t)$  и в ходе спектрального анализа, составляя порядка 1000 с. При этом обнаруженная изменчивость наблюдается не у всех испытуемых, что может быть связано с индивидуальными особенностями регуляции ССС, в том числе гуморальной (медленная регуляция посредством гормонов).

Интересные наблюдения были сделаны при исследовании взаимной корреляции  $S(t)$  и временной динамики спектральных индексов. Ряд исследователей предполагают, что  $LF$ -колебания усиливаются при реализации барорефлекторного контроля артериального давления на уровне сосудистого тонуса за счет наличия петли обратной связи [11] и навязываются системе, обеспечивающей регуляцию частоты сердечных сокращений [8]. При этом последняя имеет пассивный характер динамики, т. е. не способна демонстрировать колебания в отсутствие ее возбуждения внешним сигналом. Если такая гипотеза верна, то можно было бы ожидать два результата: увеличение мощности  $LF$ -диапазона в спектре КИГ в ответ на увеличение мощности  $LF$ -диапазона в спектре ФПГ; рост синхронизации (увеличение индекса  $S$ ) при увеличении интенсивности осцилляций в  $LF$ -частотном диапазоне. Однако результаты наших исследований не подтверждают подобных ожиданий. Более того, корреляционный анализ выявил пять случаев наблюдения значимой отрицательной корреляции между  $S(t)$  и  $LF_{КИГ}(t)$  и пять случаев значимой отрицательной корреляции между  $S(t)$  и  $LF_{ФПГ}(t)$ , причем для двух испытуемых корреляции в  $LF$ -диапазоне были от-

рицательными одновременно (см. табл. 2, испытуемые № 8 и 13). Таким образом, рост степени синхронизации колебаний в значительном проценте случаев наблюдался при одновременном падении их интенсивности.

Вышеуказанные наблюдения свидетельствуют против гипотезы о пассивном характере работы регуляции частоты сердечных сокращений, указывая на достаточно сложный автоколебательный и относительно автономный характер ее динамики, подтверждая выводы известных экспериментальных работ, в частности [12, 13]. При этом наличие выраженных ультрамедленных колебаний  $S(t)$  во времени является, видимо, в большей степени следствием изменения во времени гуморальными факторами силы связи между исследуемыми механизмами регуляции, а не их индивидуальной активности.

Другие интересные результаты получены при анализе корреляций  $S(t)$  и  $HF$ -колебаний в КИГ и ФПГ. В 19 случаях была выявлена значимая корреляция  $S(t)$  и  $HF_{КИГ}(t)$  (в девяти случаях — отрицательная, в 10 — положительная). В 17 случаях была выявлена значимая корреляция  $S(t)$  и  $HF_{ФПГ}(t)$  (в 10 случаях — отрицательная, в семи — положительная). Учитывая, что при расчете  $S$  используются спектральные составляющие, относящиеся только к  $LF$ -диапазону, наличие таких корреляций может быть объяснено исключительно нелинейным характером взаимодействия колебательных процессов в ССС, относящихся к  $LF$ - и  $HF$ -диапазонам. Известны модельные представления, подразумевающие такое взаимодействие [14], однако детали такой коллективной динамики различных отделов, обеспечивающих регуляцию



■ **Рис. 6.** Структурная схема автономной регуляции кровообращения, учитывающая взаимодействие между  $LF$ - ( $0,1$  Гц) и  $HF$ -механизмами ( $> 0,1$  Гц) регуляции ритма сердца (КИГ) и сосудистого тонуса (ФПГ) и системе гуморальной регуляции ( $< 0,1$  Гц)

■ **Fig. 6.** The structural outline of autonomic regulation of blood circulation, taking into account the interaction between  $LF$  ( $0.1$  Hz) and  $HF$ -mechanisms ( $> 0.1$  Hz) of heart rate regulation (CIG) and vascular tone (PPG) and humoral regulation system ( $< 0.1$  Hz)

кровообращения, требуют проведения специальных дополнительных исследований.

В исследованиях были выявлены большие лаги взаимных корреляций между  $S(t)$  и спектральными индексами, которые могут указывать на наличие значительных запаздываний в связях между исследуемыми механизмами вегетативной регуляции кровообращения. Однако такие исследования требуют увеличения статистики, при имеющейся не удалось выявить значимые отличия от нуля среднего лага, соответствующего максимуму (по модулю) корреляции.

По результатам проведенных исследований можно предложить структурную схему, которая позволяет объяснить выявленные особенности взаимодействия между исследуемыми контурами регуляции (рис. 6). Симпатический отдел вегетативной нервной системы в этой качественной модели представлен барорефлекторной регуляцией тонуса артерий и регуляцией частоты сердечных сокращений, причем эти механизмы могут рассматриваться как относительно автономные и независимые взаимодействующие автоколебательные системы, а коэффициент связи  $K$  между ними модулируется гуморальными факторами с характерным периодом порядка 1000 с. Результаты спектрального анализа могут свидетельствовать о влиянии гуморальных факторов на активность в  $HF$ -частотном диапазоне сигналов ФПГ и КИГ. Можно отметить нелинейный характер взаимодействия ритмов в  $LF$ - и  $HF$ -частотных диапазонах спектров ФПГ и КИГ.

## Заключение

В ходе анализа динамики индекса фазовой синхронизации контуров вегетативной регуляции частоты сердечных сокращений и тонуса артерий по двухчасовым записям здоровых испытуемых были выявлены признаки колебательного характера динамики индекса  $S$  с характерным периодом около 1000 с у части испытуемых.

Получены свидетельства в пользу известной гипотезы о том, что низкочастотная вегетативная регуляция сердца и барорефлекторная регуляция сосудистого тонуса с характерными частотами около 0,1 Гц могут рассматриваться как две относительно независимые взаимодействующие автоколебательные системы.

Колебания степени их синхронизации могут быть объяснены модуляцией силы связи между ними со стороны гуморальной регуляции (см. рис. 6). Выявленные колебания значения суммарного процента фазовой синхронизации с характерным периодом около 1000 с могут являться следствием такой модуляции силы связи. Однако наличие записей без видимой изменчивости синхронизации 0,1 Гц составляющих КИГ и ФПГ указывает на сильное влияние индивидуальных особенностей испытуемых и может оказаться перспективным наблюдением для решения задач персонализированной медицинской диагностики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00326, гранта Президента РФ МД-3318.2017.7.

## Литература

1. Боровкова Е. И., Караваев А. С., Киселев А. Р., Шварц В. А., Миронов С. А., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Метод диагностики синхронизованности 0,1 Гц ритмов вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы в реальном времени // *Анналы аритмологии*. 2014. Т. 11. № 2. Р. 129–136. doi:10.15275/annaritm.2014.2.7
2. Караваев А. С., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Восстановление моделей скалярных систем с запаздыванием по временным рядам // *Письма в ЖТФ*. 2001. Т. 27. № 10. С. 43–51.
3. Нейфельд И. В., Киселев А. Р., Караваев А. С., Прохоров М. Д., Бобылева И. В., Гриднев В. И., Киричук В. Ф., Рогожина И. Е. Особенности показателей вегетативной регуляции кровообращения и вариабельности сердечного ритма у женщин в перименопаузе // *Анналы аритмологии*. 2014. Т. 11. № 2. С. 98–108. doi:10.15275/annaritm.2014.2.4
4. Киселев А. Р., Гриднев В. И., Караваев А. С., Посненкова О. М., Прохоров М. Д., Пономаренко В. И., Безручко Б. П. Персонализация подхода к назначению гипотензивной терапии у больных артериаль-

- ной гипертензией на основе индивидуальных особенностей вегетативной дисфункции сердечно-сосудистой системы // *Артериальная гипертензия*. 2011. № 17(4). С. 354–360.
5. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P. Effects of Antihypertensive Treatment on Cardiovascular Autonomic Control // *The Anatolian Journal of Cardiology*. 2014. Vol. 14. P. 701–710.
  6. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P. Selection of Optimal Dose of Beta-Blocker Treatment in Myocardial Infarction Patients Basing on Changes in Synchronization between 0.1 Hz Oscillations in Heart Rate and Peripheral Microcirculation // *Journal of Cardiovascular Medicine*. 2012. Vol. 13. Iss. 8. P. 491–498. doi:10.2459/JCM.0b013e3283512199
  7. Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation and Clinical use // *Circulation*. 1996. Vol. 93. Iss. 5. P. 1043–1065. doi:10.1161/01.CIR.93.5.1043
  8. Bigger Jr. J. T., Fleiss J. L., Steinman R. C., Rolnitzky L. M., Kleiger R. E., Rottman J. N. Frequency Do-

- main Measures of Heart Period Variability and Mortality after Myocardial Infarction // *Circulation*. 1992. Vol. 85. Iss. 1. P. 164–171. doi:10.1161/01.CIR.85.1.164
9. Huikuri H. V., Seppänen T., Koistinen M. J., Airaksinen K. E. J., Ikäheimo M. J., Castellanos A. Abnormalities in Beat-to-Beat Dynamics of Heart Rate before the Spontaneous Onset of Life-Threatening Ventricular Tachyarrhythmias in Patients with Prior Myocardial Infarction // *Circulation*. 1996. Vol. 93. Iss. 10. P. 1836–1844. doi:10.1161/01.CIR.93.10.1836
  10. Боровкова Е. И., Сказкина В. В., Киселев А. Р., Мironov С. А., Шварц В. А., Попов И. А., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Бокерия О. Л., Караваев А. С. Ультранизкочастотная динамика подсистем вегетативной регуляции ритма сердца и сосудистого тонуса у здоровых лиц // *Анналы аритмологии*. 2017. Т. 14. № 2. С. 114–120. doi:10.15275/annaritmol.2017.2.7
  11. Hramov A. E., Koronovsky A. A., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Detecting synchronization of self-sustained oscillators by external driving with varying frequency // *Physical Review E*. 2006. N 73. P. 026208-1–026208-8026208.
  12. Guyton A. C., Coleman T. G., Granger H. J. Circulation: Overall Regulation // *Annu Rev Physiol*. 1972. N 34. P. 13–46. doi:10.1146/annurev.ph.34.030172.000305
  13. Julien C. The Enigma of Mayer Waves: Facts and Models // *Cardiovascular Research*. 2006. N 70. P. 12–21.
  14. Караваев А. С., Киселев А. Р., Гриднев В. И., Боровкова Е. И., Прохоров М. Д., Посненкова О. М. и др. Фазовый и частотный захват 0,1 Гц колебаний в ритме сердца и барорефлекторной регуляции артериального давления дыханием с линейно меняющейся частотой у здоровых лиц // *Физиология человека*. 2013. № 39(4). С. 93–104. doi:10.7868/S0131164613010049

UDC 612.067, 530.182

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.123

### Slow Dynamics in Synchronization of Contours of Autonomic Regulation of Cardiovascular Rhythm

Skazkina V. V.<sup>a</sup>, Student, skazkinavv@yandex.ru

Borovkova E. I.<sup>a</sup>, Assistant Professor, rubanei@mail.ru

Kulminskiy D. D.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, Assistant Professor, kulminskydd@gmail.com

Butenko A. A.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, butenkoaan@yandex.ru

Galushko T. A.<sup>a</sup>, Student, tanya.galushcko@yandex.ru

Shvartz V. A.<sup>b</sup>, PhD, Med., shvartz-va@ya.ru

<sup>a</sup>Saratov State University, 83, Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation

<sup>b</sup>A. N. Bakoulev SCCVS, Department of Surgical Treatment for Interactive Pathology, 135, Roublyevskoe Sh., Moscow, 121552, Russian Federation

**Introduction:** The main problem in analyzing low-frequency components of biological processes is conducting specialized experiments with long-term signal recording. However, the information about the system behavior on long scales can make an invaluable contribution to understanding the nature of the interaction between separate elements of the system. **Purpose:** Analyzing the features of the dynamics of the proposed quantitative index which characterizes the degree of phase synchronization of complex non-stationary biological systems (contours of autonomic regulation of the cardiovascular system) on time scales about tens and hundreds of characteristic oscillation periods (hundreds of seconds) using long experimental records. **Results:** During the experiments, we obtained simultaneous registration of two-hour signals from 23 healthy subjects: cardiointervalogram and photoplethysmogram vessels. The dynamics of the total percentage of phase synchronization (S index) of 0.1 Hz oscillations in the PPG and CIG was estimated in sliding windows. Similarly, we investigated the powers of so-called low-frequency (LF, 0.1 Hz) and high-frequency (HF, > 0.1 Hz) components of the spectrum of the original signals. The features of the interaction between the studied indices were evaluated using correlation analysis methods. We have found that the S index dynamics shows signs of its oscillatory nature with a characteristic oscillation period about 1000 s. The interaction between LF and HF oscillations in the autonomic circulatory regulation is of a complex nonlinear character. We have also identified signs of oscillations with a period about 1000 s in the dependencies of the total percentage of the phase synchronization of 0.1 Hz contours in circulatory regulation. A structural model of the interaction between circulatory regulatory contours is formed which explains the observed effects. **Practical relevance:** Obtaining fundamental knowledge about the interaction and regulation of the cardiovascular system elements will allow us to improve the methods we are developing for the diagnostics and therapy of pathological disturbances in the cardiovascular system.

**Keywords** — Data Analysis, Phase Synchronization, Nonlinear Dynamics, Statistical Analysis, Autonomic Regulation, Cardiovascular System.

### References

1. Borovkova E. I., Karavaev A. S., Kiselev A. R., Shvartz V. A., Mironov S. A., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Method for Diagnostics of Synchronization of 0.1 Hz Rhythms of Cardiovascular System Autonomic Regulation in Real Time. *Annaly aritmologii*, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 129–136 (In Russian). doi:10.15275/annaritmol.2014.2.7
2. Karavaev A. S., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Reconstruction of Scalar Time-Delay System Models. *Technical Physics Letters*, 2001, vol. 27, no. 5, pp. 414–418.
3. Neyfel'd I. V., Kiselev A. R., Karavaev A. S., Prokhorov M. D., Bobyleva I. V., Gridnev V. I., Kirichuk V. F., Rogozhina I. E. Peculiarities of Indexes of Autonomic Regulation of Blood

- Circulation and Heart Rate Variability in Perimenopausal Women. *Annaly aritmologii*, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 98–108 (In Russian). doi:10.15275/annaritmol.2014.2.4
4. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Prochorov M. D., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P. Individual Approach to Antihypertensive Drug Selection in Hypertensive Patients Based on Individual Features of Autonomic Cardiovascular Dysfunction. *Arterial'naiia gipertenziia*, 2011, no. 17(4), pp. 354–360 (In Russian).
  5. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P. Effects of Antihypertensive Treatment on Cardiovascular Autonomic Control. *The Anatolian Journal of Cardiology*, 2014, vol. 14, pp. 701–710.
  6. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P. Selection of Optimal Dose of Beta-Blocker Treatment in Myocardial Infarction Patients Basing on Changes in Synchronization between 0.1 Hz Oscillations in Heart Rate and Peripheral Microcirculation. *Journal of Cardiovascular Medicine*, 2012, vol. 13, iss. 8, pp. 491–498. doi:10.2459/JCM.0b013e3283512199
  7. Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation and Clinical use. *Circulation*, 1996, vol. 93, iss. 5, pp. 1043–1065. doi:10.1161/01.CIR.93.5.1043
  8. Bigger Jr. J. T., Fleiss J. L., Steinman R. C., Rolnitzky L. M., Kleiger R. E., Rottman J. N. Frequency Domain Measures of Heart Period Variability and Mortality aAfter Myocardial Infarction. *Circulation*, 1992, vol. 85, iss. 1, pp. 164–171. doi:10.1161/01.CIR.85.1.164
  9. Huikuri H. V., Seppänen T., Koistinen M. J., Airaksinen K. E. J., Ikäheimo M. J., Castellanos A. Abnormalities in Beat-to-Beat Dynamics of Heart Rate before the Spontaneous Onset of Life-Threatening Ventricular Tachyarrhythmias in Patients with Prior Myocardial Infarction. *Circulation*, 1996, vol. 93, iss. 10, pp. 1836–1844. doi:10.1161/01.CIR.93.10.1836
  10. Borovkova E. I., Skazkina V. V., Kiselev A. R., Mironov S. A., Shvartz V. A., Popov I. A., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Bockeria O. L., Karavaev A. S. Ultra-Low Frequency Dynamics of Subsystems of Autonomic Control of Heart Rate and Vascular Tone in Healthy Subjects. *Annaly aritmologii*, 2017, vol. 14, no. 2, pp. 114–120 (In Russian). doi:10.15275/annaritmol.2017.2.7
  11. Hramov A. E., Koronovsky A. A., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Detecting Synchronization of Self-Sustained Oscillators by External Driving with Varying Frequency. *Physical Review E*, 2006, no. 73, pp. 026208-1–026208-8.
  12. Guyton A. C., Coleman T. G., Granger H. J. Circulation: Overall Regulation. *Annu Rev Physiol*, 1972, no. 34, pp. 13–46. doi: 10.1146/annurev.ph.34.030172.000305
  13. Julien C. The Enigma of Mayer Waves: Facts and Models. *Cardiovascular Research*, 2006, no. 70, pp. 12–21.
  14. Karavaev A. S., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Phase and Frequency Locking of 0.1 Hz Oscillations in Heart Rhythm and Baroreflex Control of Arterial Pressure by Respiration with Linearly Varying Frequency in Healthy Subjects *Fiziologiya cheloveka*, 2013, no. 39(4), pp. 93–104 (In Russian). doi: 10.7868/S0131164613010049

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

П. А. Степанов<sup>а</sup>, старший преподаватель  
 М. Ю. Охтилев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор  
 Б. В. Соколов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** одной из проблем оценивания технического состояния сложных организационно-технических объектов является отсутствие единой методологии оценивания и управления их состоянием. Частью решения этой проблемы является создание единой модели представления знаний об оцениваемом объекте и его визуальном представлении на мнемосхеме. **Цель исследования:** объединение представления знаний о поведении оцениваемого объекта и представления этого объекта во время оценивания технического состояния в единую модель. **Результаты:** разработана адаптированная вычислительная модель, описывающая диаграммы. На основе этой модели предложен способ описания мнемосхем, используемых при оценивании технического состояния объекта. Реализован прототип программного средства, генерирующего визуальное представление мнемосхем по их вычислительным моделям. Показано, что адаптированная вычислительная модель может описывать как эталонное поведение объекта, так и мнемосхему, которая его представляет в процессе оценивания технического состояния. **Практическая значимость:** разработанный на основе адаптированной вычислительной модели прототип программного средства позволяет упростить создание визуальных средств, используемых для оценивания технического состояния сложных организационно-технических объектов.

**Ключевые слова** — вычислительная модель, визуальный язык, мнемосхема, контроль технического состояния.

### Введение

Эксплуатация и обслуживание объектов ракетно-космической техники всегда были и остаются проблемными в силу их сложности и высокой стоимости принимаемых при этом решений. В большой степени это связано с оцениванием состояний (технических состояний — ТС) и выработкой управляющих воздействий (разовых команд, временных программ). Решения такого типа принимаются экспертом, специалистом в соответствующей предметной области, на основании результатов обработки измерительной информации (телеметрической, баллистико-навигационной, командно-программной и пр.).

Проведенные исследования показывают [1], что одной из ключевых проблем при этом является отсутствие универсальных технологий и методологий для оценивания и управления состоянием объектов ракетно-космической техники как сложных организационно-технических систем. В частности, для моделирования поведения такого объекта могут использоваться разнообразные полимодельные комплексы, в то время как разработка графических систем визуализации как средств обеспечения взаимодействия с лицом, принимающим решения, является самостоятельной инженерной задачей. Кроме того, известно, что доля затрат на разработку и сопровождение программного обеспечения подобных систем поддержки принятия решений [2, 3] неуклонно

возрастает и может составлять от 60 до 90 % стоимости всей системы [4]. Таким образом, с учетом всего вышесказанного существует актуальная задача описания объекта контроля и визуализации его состояния с помощью единой математической модели.

### Применение вычислительных моделей к визуализации мнемосхем

Необходимо отметить, что, во-первых, для визуализации ТС объекта в процессе контроля обычно используются мнемосхемы — специальные диаграммы, схематически представляющие узлы и агрегаты контролируемого объекта. Такие диаграммы могут трактоваться как изображение на визуальном языке, имеющем синтаксис и семантику. Попытки создать универсальные подходы к разработке мнемосхем уже предпринимались вне контекста объединения эталонного поведения оцениваемого объекта и его графического представления в единую модель [5, 6]. Во-вторых, подходящим способом моделирования поведения контролируемого объекта в условиях неполной и (или) недостоверной измерительной информации является вычислительная модель (ВМ) [7]. ВМ нашли свое применение в концептуальном программировании и технологиях недоопределенных моделей; они широко используются в задачах конструирования программного обеспечения [8, 9]; кроме того, подобные модели

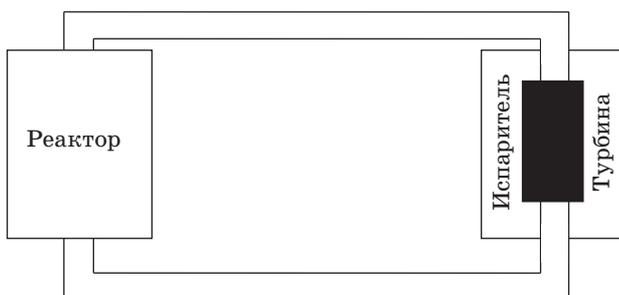
представления знаний занимают прочные позиции при выполнении оценивания ТС объектов ракетно-космической техники [10, 11]. Таким образом, предложив способ визуализации состояния объекта средствами ВМ, можно добиться создания единой методологии для представления знаний об объекте и программного средства для оценивания ТС этого объекта.

В связи с этим, предложив способ описания мнемосхемы средствами ВМ, можно объединить знания об оцениваемом объекте и визуализацию этих знаний в единую модель. Ниже представлена основная идея описания мнемосхем в составе графического пользовательского интерфейса в системах поддержки принятия решений при оценивании ТС объектов ракетно-космической техники.

Рассмотрим пару  $a = \{n, w\}$ . Назовем ее атрибутом, где  $n$  — имя атрибута, а  $w$  — значение атрибута (если задано). Введем понятие визуального примитива  $v = \{A, fg(A)\}$ , где  $A$  — множество атрибутов примитива, а  $fg(A)$  — функция, преобразующая значения атрибутов в изображение. Расширив оригинальную ВМ понятием визуального примитива, можно перейти к ВМ, описывающей диаграмму.

Назовем диаграммой множество  $D = \{A, G, V, R\}$ , в котором  $A$  — множество атрибутов,  $G$  — алгебраическая система, заданная на атрибутах,  $V$  — множество визуальных примитивов такое, что принадлежащие им атрибуты  $A_v$  являются подмножеством  $A$ , и  $R$  — множество отношений, заданное на атрибутах. При этом правила  $R$  формулируются в виде предикат/соотношение, где предикат представляет условие, при котором можно выполнить соотношение. Таким образом, диаграмма представляет собой расширенную ВМ, обладающую графическим интерфейсом.

Рассмотрим пример. На рисунке изображен фрагмент мнемосхемы тракта наддува топливных баков ракеты «Союз-2», представляющий реактор, соединенный трубопроводом с турбиной.



■ Фрагмент мнемосхемы тракта наддува топливных баков  
 ■ Snippet of mnemonic scheme of fuel tanks pressurization circuit

Изображение состоит из четырех сущностей: реактора, турбины и двух трубопроводов, — которые образуют множество визуальных примитивов  $V$ . Предполагая, что каждый из примитивов имеет в качестве атрибутов свои координаты и размеры, можно установить соотношения, ставящие в соответствие координаты всех четырех сущностей так, чтобы при перемещении одной перемещались либо меняли размер другие. Для передачи значений измеряемых параметров могут использоваться атрибуты, связанные с текстовыми полями; одновременно атрибут «цвет» сущности может использоваться для индикации того, что состояние узла или агрегата соответствует или не соответствует расчетному состоянию. Отметим, что представленные на диаграмме сущности сами могут быть описаны ВМ, построенными с использованием более мелких графических примитивов.

### Преимущества и недостатки применения вычислительных моделей для представления диаграмм

Использование ВМ для описания визуальной части модели обладает рядом преимуществ:

- 1) знания об объекте и знания о его изображении описываются единой моделью; специалисты, проводящие контроль ТС, должны изучить только одну модель;
- 2) реализация интегральных оценочных характеристик модели естественным образом может быть получена из индивидуальных оценочных характеристик;
- 3) модель сопрягается с источником, содержащим измерительную информацию контролируемого объекта, путем отображения этой информации в атрибуты модели.

Тем не менее вышеописанный подход выявляет ряд специфических проблем. Во-первых, оригинальная ВМ нестационарна, т. е. предполагает возможность недетерминированных вычислений. Нестационарные модели не могут взаимодействовать с человеком (с точки зрения удобства использования), поэтому модель должна быть приведена к детерминированному виду, для чего могут использоваться алгоритмы, аналогичные алгоритмам для приведения к детерминированному виду конечных автоматов.

Во-вторых, описание диаграммы является неполным без описания ее пользовательского интерфейса (диалоговых окон, реакции на клавиатуру и мышь и пр.). Ввиду отсутствия в ВМ механизма организации интерфейса пользователя этот механизм должен быть построен средствами традиционного программирования, при этом взаимодействие между таким внешним интерфейсом и ВМ должно осуществляться по тем же

принципам, что и взаимодействие с источником измерительной информации, т. е. через значения атрибутов модели.

### Заключение

Представленная модель была реализована в виде макета универсального программного сред-

ства, принимающего на вход спецификации мнемосхем и генерирующего на их основе графические представления [12]. В рамках данного макета была реализована мнемосхема одной из подсистем ракеты-носителя «Союз-2» — тракта наддува топливных баков. В рамках дальнейшей работы предполагается расширение набора моделей.

### Литература

1. Зеленцов В. А., Ковалев А. П., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов // Тр. СПИИРАН. 2013. № 5(28). С. 7–81. doi:10.15622/sp.28.1
2. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. — М.: Наука, 2006. — 410 с.
3. Sokolov B., Yusupov R., Okhtilev M., Maydanovich O. Influence Analysis of Information Technologies on Progress in Control Systems for Complex Objects // New Trends in Information Technologies: Proc. of Intern. Conf. Information–Interaction–Intellect (iii2010), Varna, Bulgaria, June 23–27, 2010. P. 78–91.
4. Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Кузусль Н. Н., Соколов Б. В., Цивирко Е. Г., Юсупов Р. М. Междисциплинарный подход к оцениванию и анализу эффективности информационных технологий и систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 11. С. 7–16.
5. Бильфельд Н. В., Ерыпалова М. Н. Разработка технологических мнемосхем на языках высокого уровня // Новый университет. Сер.: Технические науки. 2015. № 3–4. С. 5–10.
6. Сергеев Д. А., Ковин Р. В. Универсальная векторная графическая компонента для работы с мнемосхемами технологических процессов // Молодежь и современные информационные технологии: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9–13 ноября 2015 г.: в 2 т./ Национальный исследовательский Томский политехнический университет; Институт кибернетики; под ред. Т. Е. Мамоновой. Томск, 2016. Т. 2. С. 103–104.
7. Тыгу Э. Х. Концептуальное программирование. — М.: Наука, 1984. — 255 с.
8. Сарычев В. Г. Разработка программного комплекса автоматизированного конструирования алгоритмов и программ на основе вычислительных моделей// Наука, технологии, инновации: тр. конф., Новосибирск, 1–5 декабря 2015 г. Новосибирск, 2015. С. 111–112.
9. Феоктистов А. Г., Горский С. А. Язык спецификации вычислительных моделей в масштабируемых пакетах прикладных программ //Современные наукоемкие технологии. 2016. № 7-1. С. 84–88.
10. Шмелев В. В. Модели технологических процессов функционирования космических средств //Авиа-космическое приборостроение. 2015. № 4. С. 78–93.
11. Шмелев В. В., Самойлов Е. Б., Нездоровин Н. В. Распространение свойств сети Петри на вычислительную модель анализа результатов телеизмерений // Т-COMM: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 6. С. 88–89.
12. Степанов П. А., Охтилев М. Ю. Применение вычислительных моделей для создания редактора диаграмм // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 11. С. 939–942. doi:10.17586/0021-3454-2016-59-11-939-943

UDC 004.94

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.132

### Visualization of Technical Status of Complex Objects using Computational Models

Stepanov P. A.<sup>a</sup>, Senior Lecturer, pavel@stepanoff.info

Okhtilev M. Yu.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, oxt@mail.ru

Sokolov B. V.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, sokol@iias.spb.su

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** One of the problems in evaluating technical status of complex organizational and technical objects is the absence of a single methodology for the evaluation and status control. A part of solving this problem could be the development of a unified model to represent the knowledge about the evaluated object and its visual representation on a mnemonic scheme. **Purpose:** Unifying the representation of knowledge regarding the evaluated object and its visual representation in a single model. **Results:** An adapted computational model is developed which describes diagrams. On the base of this model, we proposed a way to define mnemonic schemes

used during an object technical status evaluation. A software prototype is implemented, generating visual representation of mnemonic schemes by their computational models. It has been demonstrated that the adapted computational model can describe both the predicted behavior of an object and the mnemonic scheme which represents it during the technical status evaluation. **Practical relevance:** The developed software prototype based on the adapted computational model can facilitate the development of visual tools used for the evaluation of technical status of complex organizational and technical objects.

**Keywords** — Computational Model, Visual Language, Mnemonic Scheme, Technical Status Evaluation.

## References

- Zelentsov V. A., Kovalev A. P., Okhtilev M. Y., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Creation and Application Methodology of the Intelligent Information Technology of Complexity Objects Space and Ground Based Monitoring. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2013, no. 5(28), pp. 7–81 (In Russian). doi:10.15622/sp.28.1
- Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniia strukturnoi dinamiki slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov* [Intellectual Technologies of Monitoring and Controlling Structured Dynamics of Complex Technical Objects]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 410 p. (In Russian).
- Sokolov B. V., Yusupov R. M., Okhtilev M. Yu., Maydanovich O. V. Influence Analysis of Information Technologies on Progress in Control Systems for Complex Objects. *Proc. of Intern. Conf. Information-Interaction-Intellect (iii2010) "New Trends in Information Technologies"*, Varna, Bulgaria, June 23–27, 2010, pp. 78–91.
- Maydanovich O. V., Okhtilev M. Yu., Kussul N. N., Sokolov B. V. Interdisciplinary Approach to Estimation and Analysis of Information Technologies and Systems Efficiency. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2010, vol. 53, no. 11, pp. 7–16 (In Russian).
- Bilfeld N. V., Eripalova M. N. Development of Technological Mnemonic Schemes in High-Level Programming Languages. *Novyi universitet. Tekhnicheskie nauki* [New University. Technical Sciences], 2015, no. 3–4, pp. 5–10 (In Russian). doi:10.15350/2221-9552.2015.3-4
- Sergeev D. A., Kovin R. V. Universal Vector Graphic Component for Work with Mnemonic Schemes of Technical Processes. *Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii"* [Proc. of XIII Intern. Science and Practical Conf. of Students, Post-Graduate Students and Young Scientists "Youth and Modern Information Technology" (YMIT)], Tomsk, 9–13 November, 2015. Tomsk, 2016, vol. 2, pp. 103–104 (In Russian).
- Tyugu T. H. *Kontseptual'noe programmirovaniye* [Concept Programming]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 255 p. (In Russian).
- Saryichev V. G. Development of Software Package for Automated Design of Algorithms and Programs Based on Computational Models. *Trudy konferentsii "Nauka, tekhnologii, innovatsii"* [Proc. of Conf. "Science, Technologies, Innovations"], Novosibirsk, December 1–5, 2015, pp. 111–112 (In Russian).
- Feoktistov A. G., Gorsky S. A. Specification Language of Computational Models in Scalable Applied Software Packages. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2016, no. 7-1, pp. 84–88 (In Russian).
- Shmelev V. V. Process Models of Functioning of Space Assets. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2015, no. 4, pp. 78–93 (In Russian).
- Shmelev V. V., Samoylov E. B., Nezdorovin N. V. Expansion of Properties of Petri Nets to Computational Models of Result Analysis. *T-COMM: Telekommunikatsii i transport* [T-COMM: Telecommunications and Transport], 2013, vol. 7, no. 6, pp. 88–89 (In Russian).
- Stepanov P. A., Okhtilev M. Yu. Application of Computational Models to Development of Diagram Editor. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 59, no. 11, pp. 939–942 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2016-59-11-939-943

**БАКИН**  
**Евгений**  
**Александрович**



Доцент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиоэлектронные системы».

В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 15 научных публикаций и шести патентов на изобретения.

Область научных интересов — компьютерное моделирование, системы цифровой связи.

Эл. адрес: jenyb@mail.ru

**БЕЗЗАТЕЕВ**  
**Сергей**  
**Валентинович**



Заведующий кафедрой технологий защиты информации и техноферной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1980 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — теория информации, теория кодирования, системы информационной безопасности.

Эл. адрес: bsv@aanet.ru

**БЛАУНШТЕЙН**  
**Натан**  
**Шаевич**



Гражданин Израиля.

Профессор Иерусалимского технологического института, профессор-эмиритуз кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль.

В 1972 году окончил Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника, включая квантовую».

В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором около 200 научных публикаций, в том числе 12 монографий, пяти патентов и трех изобретений.

Область научных интересов — радиофизика, системы проводной и беспроводной связи, радары, оптика и лидары.

Эл. адрес: nathan.blaunstein@hotmail.com

**БОРОВКОВА**  
**Екатерина**  
**Игоревна**



Ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

В 2012 году окончила Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Биомедицинская инженерия».

Является автором 15 научных публикаций и 12 свидетельств об официальной регистрации программного обеспечения.

Область научных интересов — развитие методов исследования нелинейных радиотехнических систем со сложной динамикой по их временным рядам.

Эл. адрес: rubanei@mail.ru

**БУТЕНКО**  
**Анна**  
**Анатольевна**



Старший преподаватель кафедры романо-германской филологии и переводоведения Института филологии и журналистики Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

В 2000 году окончила Саратовский государственный университет по специальности «Филолог». Является автором 10 научных публикаций.

Область научных интересов — теория перевода, когнитивная лингвистика.

Эл. адрес: butenkoaan@yandex.ru

**ВОЛОШИНА**  
**Наталья**  
**Викторовна**



Доцент кафедры технологий защиты информации и техноферной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2000 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиотехника».

В 2006 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 20 научных публикаций.

Область научных интересов — цифровая обработка изображений, информационная безопасность, цифровые водяные знаки, системы обработки и передачи аудиовидеоданных, безопасность киберфизических систем.

Эл. адрес: natali@yandex.ru

**ГАЛУШКО**  
Татьяна  
Александровна



Студентка, делопроизводитель кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. Область научных интересов — развитие методов исследования нелинейных радиофизических систем со сложной динамикой по их временным рядам.  
Эл. адрес: tanya.galushcko@yandex.ru

**ГИЛЬМУТДИНОВ**  
Марат  
Равилевич



Доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1998 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления». В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 21 научной публикации и десяти патентов на изобретения. Область научных интересов — теория информации (кодирование источников), методы цифровой обработки изображений и видеоданных, методы передачи видеoinформации.  
Эл. адрес: mgilmutdinov@gmail.com

**ДОЙНИКОВА**  
Елена  
Владимировна



Научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 2009 году окончила с отличием Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Компьютерная безопасность». Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — безопасность компьютерных сетей, методы анализа рисков компьютерных сетей, управление информационными рисками.  
Эл. адрес: doynikova@comsec.spb.ru

**ЕВСЕЕВ**  
Григорий  
Сергеевич



Доцент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1970 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 1974 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций. Область научных интересов — системы связи и телекоммуникации.  
Эл. адрес: egs@vu.spb.ru

**ЕГОРОВ**  
Николай  
Дмитриевич



Аспирант кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2013 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Комплексная защита объектов информатизации». Является автором 11 научных публикаций и трех патентов на изобретения. Область научных интересов — теория информации (кодирование источников), методы цифровой обработки изображений и видеоданных, методы передачи видеoinформации.  
Эл. адрес: negorov.91@gmail.com

**ЕГОРОВА**  
Инга  
Сергеевна



Аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. В 2015 году окончила Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по специальности «Технологии проектирования системного и прикладного программного обеспечения». Область научных интересов — автоматизация процессов разработки качественного программного обеспечения.  
Эл. адрес: is.egorova@mail.ru

**ЕФАНОВ  
Владимир  
Николаевич**



Профессор кафедры электроники и биомедицинских технологий Уфимского государственного авиационного технического университета.

В 1973 году окончил Уфимский авиационный институт им. С. Орджоникидзе по специальности «Промышленная электроника».

В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 440 научных публикаций и 36 патентов на изобретения.

Область научных интересов — управление сложными техническими системами, высокопроизводительные бортовые вычислительные комплексы.

Эл. адрес: efanov@mail.ru

**ИЦЫКСОН  
Владимир  
Михайлович**



Доцент, заведующий кафедрой компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

В 1996 году окончил Санкт-Петербургский государственный технический университет по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — программная инженерия, методы разработки качественного программного обеспечения, статический анализ и верификация программ.

Эл. адрес: vlad@icc.spbstu.ru

**КНЯЖСКИЙ  
Александр  
Юрьевич**



Аспирант, ассистент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2016 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Приборостроение».

Является автором 15 научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, обработка информации.

Эл. адрес: knjagskij@mail.ru

**КОТЕНКО  
Игорь  
Витальевич**



Профессор, заведующий лабораторией проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1983 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Математическое обеспечение автоматизированных систем управления», в 1987 году — Военную академию связи по специальности «Инженерная автоматизированных систем управления».

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 450 научных публикаций.

Область научных интересов — безопасность компьютерных сетей, обнаружение компьютерных атак, межсетевые экраны, защита от вирусов и сетевых червей и др.

Эл. адрес: ivkote@comsec.spb.ru

**КУЧМИН  
Андрей  
Юрьевич**



Старший научный сотрудник лаборатории механики управляемых систем Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург.

В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и управление в технических системах».

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 40 научных публикаций и двух патентов на изобретения.

Область научных интересов — математическое моделирование в естественных науках, искусственный интеллект и принятие решений, математические проблемы теории управления и др.

Эл. адрес: radiotelescope@yandex.ru

**КУЛЬМИНСКИЙ  
Данил  
Дмитриевич**



Младший научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ассистент, аспирант Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

В 2014 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Методы и устройства обработки сигналов и данных».

Является автором 16 научных публикаций.

Область научных интересов — радиофизика, нелинейная динамика.

Эл. адрес: kulminskydd@gmail.com

**ЛЕВАШОВА  
Татьяна  
Викторовна**



Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1986 году окончила Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 2009 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов — управление знаниями, инженерия онтологий, управление онтологиями, управление контекстом, социоконвергентные системы.

Эл. адрес:  
tatiana.levashova@iias.spb.su

**НЕБЫЛОВ  
Александр  
Владимирович**



Профессор, заведующий кафедрой аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, директор Международного института передовых аэрокосмических технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заслуженный деятель науки РФ.

В 1971 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиоэлектронные устройства». В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 350 научных публикаций, включая 18 монографий и учебных пособий.

Область научных интересов — системы навигации и управления движением, системный анализ, обработка информации, авионика.  
Эл. адрес: iiaat@aanet.ru

**НЕБЫЛОВ  
Владимир  
Александрович**



Старший научный сотрудник Международного института передовых аэрокосмических технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем».

В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, управление и обработка информации и др.

Эл. адрес:  
vladnebylov@rambler.ru

**НЕРЕТИНА  
Вера  
Валерьевна**



Доцент кафедры информационно-измерительной техники Уфимского государственного авиационного технического университета.

В 2000 году окончила магистратуру Уфимского государственного авиационного технического университета по специальности «Электроника и микроэлектроника».

В 2005 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций и трех свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Область научных интересов — исследование субоптимального управления сложными техническими системами, обработка изображений в авиационных системах технического зрения.  
Эл. адрес: neretina@bk.ru

**НОВИКОВ  
Дмитрий  
Вадимович**



Программист, инженер Института компьютерной безопасности вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2013 году окончил специалитет по специальности «Защита информации и систем информатизации», в 2015 году — магистратуру по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения.

Является автором семи научных публикаций и двух патентов на изобретения.

Область научных интересов — машинное обучение, компьютерное зрение, сжатие изображений и видео.

Эл. адрес:  
dnovikov.suai@gmail.com

**ОХТИЛЕВ  
Михаил  
Юрьевич**



Профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Автоматизированная обработка и анализ информации».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 220 научных публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — теория программирования, теория алгоритмов, системы реального времени, математическая логика и др.

Эл. адрес: oxt@mail.ru

**ПЕРЕВАРЮХА  
Андрей  
Юрьевич**



Старший научный сотрудник лаборатории прикладной информатики Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2002 году окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 50 научных публикаций.

Область научных интересов — моделирование нелинейных явлений в биологических процессах, гибридные системы, сценарное моделирование в теории управления.

Эл. адрес: temp\_elf@mail.ru

**РЫЖИКОВ  
Дмитрий  
Михайлович**



Инженер 1-й категории ЦКУ «КосмоИнформ-Центр» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2012 году окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по специальности «Автоматизация и управление».

Является автором 20 научных публикаций.

Область научных интересов — дистанционное зондирование Земли, геоинформационные системы, теория баз данных.

Эл. адрес: ryzhikov89@yandex.ru

**САМОТУГА  
Александр  
Евгеньевич**



Ассистент кафедры комплексной защиты информации Омского государственного технического университета.

В 2013 году окончил Сибирскую государственную автомобильно-дорожную академию по специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем».

Является автором 15 научных публикаций и одного патента на изобретение.

Область научных интересов — искусственный интеллект, информационные технологии, информационная безопасность, распознавание образов, оценка психофизиологического состояния, биометрия.

Эл. адрес: samotugasashok@mail.ru

**СЕРГЕЕВ  
Александр  
Михайлович**



Старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

Является автором 32 научных публикаций.

Область научных интересов — численные методы, теория вычислительных процессов, проектирование специализированных процессоров.

Эл. адрес: asklab@mail.ru

**СКАЗКИНА  
Виктория  
Викторовна**



Магистрант кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

В 2016 году окончила бакалавриат Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Биотехнические системы и технологии».

Является автором 21 научной публикации и двух свидетельств об официальной регистрации программного обеспечения.

Область научных интересов — нелинейная динамика, анализ биологических данных.

Эл. адрес: skazkinavv@yandex.ru

**СМИРНОВ  
Александр  
Викторович**



Профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1979 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Системы автоматического управления».

В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 300 научных публикаций.

Область научных интересов — концептуальное моделирование, управление знаниями, управление контекстом, конфигурирование систем, системы поддержки принятия решений, социкиберфизические системы.

Эл. адрес: smir@iias.spb.su

**СМИРНОВ  
Константин  
Николаевич**



Ассистент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Промышленная электроника».

Является автором пяти научных публикаций.

Область научных интересов — беспроводные сенсорные сети, математическое моделирование. Эл. адрес: kossmir@gmail.com

**СМИРНОВ  
Павел  
Игоревич**



Доцент кафедры высокопроизводительных телекоммуникационных сетей университета ИТМО, генеральный директор АО «НИИ «Масштаб».

В 2003 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича по специальности «Проектирование и технология электронных средств».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций и одного патента на промышленный образец.

Область научных интересов — телекоммуникационные сети, качество обслуживания телекоммуникационных сетей, информационная безопасность и др.

Эл. адрес: p.smirnov@mashtab.org

**СОКОЛОВ  
Борис  
Владимирович**



Заместитель директора по научной работе Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, заслуженный деятель науки РФ.

В 1974 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Баллистическое обеспечение».

В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 560 научных публикаций и 21 изобретения.

Область научных интересов — автоматизация процессов управления сложными техническими объектами, структурно-функциональный синтез и управление развитием самоорганизующихся информационных систем и др.

Эл. адрес: sokol@iias.spb.su

**СОЛОВЬЕВА  
Татьяна  
Николаевна**



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2010 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника».

В 2013 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 24 научных публикаций.

Область научных интересов — техническая диагностика, теория динамических систем, теория автоматического управления, компьютерное моделирование.

Эл. адрес: al2tn@yandex.ru

**СТЕПАНОВ  
Павел  
Алексеевич**



Старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2001 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Технологии разработки программных систем».

Является автором 12 научных публикаций.

Область научных интересов — визуальные языки, имитационное моделирование, отказоустойчивые и высоконагруженные системы.

Эл. адрес: pavel@stepanoff.info

**СУЛАВКО  
Алексей  
Евгеньевич**



Доцент кафедры комплексной защиты информации Омского государственного технического университета.

В 2009 году окончил Сибирскую государственную автомобильно-дорожную академию по специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем».

В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 80 научных публикаций и одного патента на изобретение.

Область научных интересов — искусственный интеллект, информационные технологии, информационная безопасность, распознавание образов, искусственные нейронные сети, искусственные иммунные системы и др.

Эл. адрес: sulavich@mail.ru

**ТАТАРНИКОВА**

**Татьяна Михайловна**



Профессор кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1993 году окончила Восточно-Сибирский технологический институт по специальности «Электронно-вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2007 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — инфокоммуникации, взаимодействие неоднородных сетей. Эл. адрес: tm-tatarn@yandex.ru

**ЧЕЧУЛИН**

**Андрей Алексеевич**



Старший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 2005 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по специальности «Безопасность и защита информации». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — безопасность компьютерных сетей, обнаружение вторжений, анализ сетевого трафика, анализ уязвимостей, интеллектуальный анализ данных. Эл. адрес: chechulin@comsec.spb.ru

**ШВАРЦ**

**Владимир Александрович**



Врач-кардиолог, научный сотрудник отделения хирургического лечения интерактивной патологии НИИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева. В 2006 году окончил Саратовский государственный медицинский университет им. Разумовского по специальности «Лечебное дело». В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Является автором 170 научных публикаций и 20 патентов на изобретения. Область научных интересов — фундаментальные исследования в кардиологии и кардиохирургии, хирургическое лечение фибрилляции предсердий и ишемической болезни сердца, лазерная реваскуляризация миокарда и др. Эл. адрес: vashvarts@bakulev.ru

**ЯГОТИНЦЕВА**

**Наталья Владимировна**



Старший преподаватель кафедры морских информационных систем Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург. В 2010 году окончила Российский государственный гидрометеорологический университет по специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем». Является автором 25 научных публикаций и двух свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ. Область научных интересов — геоинформационные системы, телекоммуникационные сети, качество обслуживания телекоммуникационных сетей, информационная безопасность, моделирование информационных систем. Эл. адрес: p.smirnov@mashtab.org

# СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» ЗА 2017 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
<b>Balonin N. A., Balonin Y. N., Đoković D. Ž., Karbovskiy D. A., Sergeev M. B.</b> Construction of Symmetric Hadamard Matrices	5	2
<b>Nadar Ofer, Bronfman Irina, Blaunstein Nathan.</b> Optimization of Error Concealment based on analysis of Fading Types. Part 1. Statistical Description of the Wireless Video Channel, Models of BER Determination and Error Concealment of Video Signals	1	72
<b>Nadar Ofer, Bronfman Irina, Blaunstein Nathan.</b> Optimization of Error Concealment based on analysis of Fading Types. Part 2. Modified and New Models of Video Signal Error Concealment. Practical Simulations and their Results	2	67
<b>Lyandres V.</b> Compound Model of Fading	5	113
<b>Бакин Е. А., Евсеев Г. С., Смирнов К. Н.</b> Разработка и анализ алгоритмов сбора информации для одной модели телекоммуникационной системы с топологией «правильная решетка»	6	107
<b>Балонин Н. А., Сергеев М. Б.</b> Распирение гипотезы Райзера на двудиклические структуры и разрешимость матриц Адамара орнаментом в виде бицикла с двойной каймой	1	2
<b>Беззатеев С. В., Волошина Н. В.</b> Маскирующее сжатие на основе модели взвешенной структуры изображения	6	88
<b>Белим С. В., Ларионов С. Б.</b> Фильтрация импульсного шума на изображении на основе алгоритма выявления сообществ на графах	3	18
<b>Бестугин А. Р., Иванов А. Ю., Киришина И. А., Санников В. А., Филин А. Д.</b> Имитационная модель адаптивного тренажно-моделирующего комплекса специалистов управления авиацией	4	51
<b>Богачев И. В., Левенец А. В., Чье Е. У.</b> Статистический анализ телеметрических данных с точки зрения задачи сжатия	1	11
<b>Бритов Г. С.</b> Терминальное диагностирование дискретных динамических систем	4	18
<b>Бураков М. В., Коновалов А. С.</b> Модификация предиктора Смита для линейного объекта с переменными параметрами	4	25
<b>Бураков М. В., Шишлаков В. Ф.</b> Нечеткое управление солнечной батареей	5	62
<b>Буряченко В. В., Фаворская М. Н., Зотин А. Г., Пахирка А. И.</b> Восстановление границ кадра при стабилизации на основе построения модели фона и оценки значимости объектов	5	42
<b>Величко А. Н., Будков В. Ю., Карпов А. А.</b> Аналитический обзор компьютерных паралингвистических систем для автоматического распознавания лжи в речи человека	5	30
<b>Гордеев А. В.</b> Организация удаленной работы студентов со своими виртуальными машинами	2	96
<b>Горшков А. А., Осадчий А. Е., Фрадков А. Л.</b> Регуляризация обратной задачи ЭЭГ/МЭГ локальным кортикальным волновым паттерном	5	12
<b>Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г., Чернелевский А. О.</b> Адаптивная система контроля навигационных знаний	4	95
<b>Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г.</b> Нейросетевая навигационная тренажерно-обучающая система	3	89
<b>Дойникова Е. В., Чечулин А. А., Котенко И. В.</b> Оценка защищенности компьютерных сетей на основе метрик CVSS	6	76
<b>Егорова И. С., Ицыксон В. М.</b> Обзор статических методов восстановления частичных спецификаций программных библиотек на основе анализа программных проектов	6	66
<b>Егоров И. В., Мелехин В. Ф.</b> Анализ показателей надежности и сложности реализации различных вариантов структур автомата с памятью при потоке мягких отказов	3	34
<b>Егоров Н. Д., Новиков Д. В., Гильмутдинов М. Р.</b> Метод сжатия изображений без потерь с помощью контекстного кодирования по двоичным уровням	6	96
<b>Ермаков П. И., Монаков А. А.</b> Взаимнокорреляционная функция сигналов и оценка скорости ветра в многопозиционных метеорадиолокационных системах	4	86
<b>Жильникова Н. А., Шишкин А. И., Епифанов А. В., Епифанова М. А.</b> Алгоритм управления перераспределением техногенной нагрузки для территориальных природно-технических комплексов на основе геоинформационных систем	1	93
<b>Зиатдинов С. И., Соколова Ю. В.</b> Импульсные характеристики комплексных фильтров	4	111
<b>Иванов Д. О., Козлов А. В., Овчинников А. А.</b> Об одной конструкции кодов с малой плотностью проверок на четность с циклической структурой макроблоков	2	58

	№	Стр.
<b>Исаков В. И., Шепета Д. А.</b> Моделирование локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море	5	89
<b>Карин С. А.</b> Операционно-временная модель функционирования систем комплексной обработки геопространственных данных в условиях дефицита их ресурсов	2	51
<b>Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А.</b> Увеличение аэродинамического качества экраноплана за счет огибания волн	6	24
<b>Копкин Е. В., Бородько Д. Н., Пастухова К. Е.</b> Алгоритм построения квазиоптимальной гибкой программы анализа технического состояния объекта	1	31
<b>Кошкарлов А. С., Добриков В. А.</b> Двухэтапный алгоритм детектирования и режекции многочисленных помех в навигационной аппаратуре потребителей ГЛОНАСС	2	88
<b>Красильников Н. Н., Красильникова О. И.</b> Методы создания фоновых изображений и их использование при конвертации 2D-видео в 3D-формат	3	11
<b>Красильников Н. Н., Красильникова О. И.</b> Технология изготовления карт глубины для неподвижных изображений	5	52
<b>Кривошекова Ю. В., Белойван П. А., Бронштейн И. Г., Бурбаев А. М.</b> Малогабаритная вандалозащищенная видеочамера на основе многоматричной приемной системы для охраны помещений	2	101
<b>Кучмин А. Ю.</b> Анализ полиномиальных ограничений методом дерева решений	6	9
<b>Лашков И. Б.</b> Анализ поведения водителя при управлении транспортным средством с использованием фронтальной камеры смартфона	4	7
<b>Липатников В. А., Шевченко А. А., Яцкин А. Д., Семенова Е. Г.</b> Управление информационной безопасностью организации интегрированной структуры на основе выделенного сервера с контейнерной виртуализацией	4	67
<b>Мальцев Г. Н., Лесняк Д. А.</b> Применение стратегий поддержания защищенности в информационных системах	3	67
<b>Мальцев Г. Н., Якимов В. Л.</b> Современные подходы к определению уровня автономности космических аппаратов	2	34
<b>Мартынова Л. А., Розенгауз М. Б.</b> Определение эффективного поведения группы АНПА в сетевидческой системе освещения подводной обстановки	3	47
<b>Мартынова Л. А.</b> Дифференциальный метод позиционирования автономного необитаемого подводного аппарата при ведении сейсморазведки	4	77
<b>Мартынова Л. А.</b> Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов	2	77
<b>Мартынова Л. А.</b> Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки	1	83
<b>Митрофанов С. А.</b> Обзор сценариев использования широкоэвещательной передачи в сетях LTE	1	63
<b>Михайлов В. В., Переварюха А. Ю.</b> Моделирование динамики биогенной нагрузки при оценке эффективности восполнения биоресурсов	4	103
<b>Молев А. А.</b> Метод автоматического формирования телекоммуникационных модулей структурных элементов автоматизированных систем на основе XML-описания	1	40
<b>Муромцев Д. Ю., Грибков А. Н., Шамкин В. Н., Куркин И. А.</b> Полный анализ задачи энергосберегающего управления динамическими режимами барабанной сушильной установки	4	35
<b>Неретина В. В., Ефанов В. Н.</b> Алгоритм вычисления цветовых характеристик полутонного комплексированного многоспектрального изображения на основе кластеризации изображения-эталона	6	15
<b>Никифоров В. В., Подкорытов С. А.</b> Алгоритмы проверки применимости протоколов доступа к ресурсам в системах реального времени	4	59
<b>Новикова Е. С., Бекенева Я. А., Шоров А. В., Федотов Е. С.</b> Обзор алгоритмов корреляции событий безопасности для обеспечения безопасности облачных вычислительных сред	5	95
<b>Пастушок И. А.</b> Обзор передачи и оценок качества восприятия видеоданных при использовании технологии адаптивной передачи видео по протоколу НТТР	3	75
<b>Пономарев А. В.</b> Разметка изображений массового мероприятия его участниками на основе немонетарного стимулирования	3	105
<b>Рогачев В. А., Закутаев А. А., Лиференко В. Д., Колбанев М. О.</b> Неравномерность чувствительности фотоприемника как мультипликативная помеха при межкадровой обработке в прецизионных телевизионных системах	2	13

	№	Стр.
<b>Романовский О. А., Суханов А. Я., Харченко О. В., Яковлев С. В., Садовников С. А.</b> Моделирование дистанционного газоанализа атмосферы лазерной системой на основе параметрического генератора света	5	71
<b>Руннова А. Е., Журавлев М. О., Ситникова Е. Ю., Короновский А. А., Храмов А. Е.</b> Метод удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ человека при распознавании неоднозначного зрительного образа	5	105
<b>Рыжиков Д. М.</b> Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского	6	43
<b>Савин Л. О., Королев М. В., Носов М. В.</b> Разработка прогнозных моделей временного дрейфа определяющих параметров автомобильной техники при ее эксплуатации в особых условиях	3	58
<b>Сазонов А. М., Соколов А. В.</b> Математическая модель оптимального управления настраиваемой очередью из двух последовательных циклических FIFO-очереди в общей памяти	4	44
<b>Сергеев А. М., Блаунштейн Н. Ш.</b> Ортогональные матрицы симметричных структур для задач цифровой обработки изображений	6	2
<b>Сергеев Михаил Борисович.</b> К 60-летию со дня рождения	2	105
<b>Сказкина В. В., Боровкова Е. И., Кульминский Д. Д., Бутенко А. А., Галушко Т. А., Шварц В. А.</b> Медленная динамика степени синхронизованности контуров вегетативной регуляции ритма сердечно-сосудистой системы	6	123
<b>Скатков А. В., Брюховецкий А. А., Моисеев Д. В., Абрамов Т. А.</b> Интеллектуальная система мониторинга для решения крупномасштабных научных задач в облачных вычислительных средах	2	19
<b>Скатков А. В., Воронин Д. Ю., Шевченко В. И., Ключарев А. А.</b> Проактивный и реактивный риск-менеджмент IT-сервисов облачных сред	3	25
<b>Смирнов А. В., Левашова Т. В.</b> Приобретение знаний в социкиберфизических системах в процессе информационного взаимодействия ресурсов	6	113
<b>Смирнов П. И., Татарникова Т. М., Яготинцева Н. В.</b> Методическое обеспечение формирования облика геоинформационной системы морского судна	6	52
<b>Соловьева Т. Н., Переварюха А. Ю.</b> Модель сценария деградации каспийской севрюги с осциллирующей составляющей популяционной динамики	6	58
<b>Степанов П. А., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В.</b> Визуализация технического состояния сложных объектов с помощью вычислительных моделей	6	132
<b>Сулавко А. Е., Еременко А. В., Толкачева Е. В., Борисов Р. В.</b> Комплексирование независимых биометрических признаков при распознавании субъектов на основе сетей квадратичных форм, перцептронов и меры Хи-модуль	1	50
<b>Сулавко А. Е., Самотуга А. Е.</b> Влияние психофизиологического состояния подписантов на биометрические параметры рукописных образов и результаты их верификации	6	29
<b>Татарникова Т. М., Елизаров М. А.</b> Модель оценки временных характеристик при взаимодействии в сети Интернета вещей	2	44
<b>Татарникова Т. М.</b> Аналитико-статистическая модель оценки живучести сетей с топологией mesh	1	17
<b>Фомичева С. Г.</b> Теоретические аспекты квантования баз знаний в мультиагентных системах	3	2
<b>Фургат И. Б.</b> Алгоритм компенсации помех измерения и возмущений	5	21
<b>Харченко А. В., Ушаков И. А.</b> Модель наземно-космической командно-информационной сети с формированием маршрута передачи данных в условиях внешних помеховых воздействий на радиоканал	1	23
<b>Хафизов Р. Г., Хафизов Д. Г., Танаева Е. Г.</b> Алгоритм оценки параметров и прослеживания сосудов на изображениях глазного дна	1	102
<b>Хафизов Р. Г., Яранцева Т. В.</b> Оценка геометрических искажений контуров изображений губ в системах визуального ввода информации	4	2
<b>Хименко В. И., Охтилев М. Ю., Ключарев А. А., Матяш В. А.</b> Анализ информативных признаков в задачах обработки данных аэрокосмического мониторинга	2	2
<b>Чертовской В. Д.</b> Математическое описание и компьютерная реализация модели адаптивной автоматизированной системы управления производством	1	106
<b>Шелупанов А. А., Смолина А. Р.</b> Формальные основы системы поддержки формирования частных методик производства компьютерно-технической экспертизы	3	99

	№	Стр.
<b>Шилов Н. Г., Щекотов М. С.</b> Онтологическое моделирование управляющих автоматов сервисов киберфизических систем	5	80
<b>Шпак В. М.</b> О ситуационно-событийном подходе к управлению взаимодействующими дискретно-непрерывными процессами	2	26
Сведения об авторах	1	115
Сведения об авторах	2	107
Сведения об авторах	3	115
Сведения об авторах	4	115
Сведения об авторах	5	116
Сведения об авторах	6	136

### Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

**Формулы** набирайте в Word, не используя формульный редактор (MathType или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other... используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** предоставляются отдельными исходными файлами, подающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, подающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (\*.vsd); Coreldraw (\*.cdr); Excel (\*.xls); Word (\*.doc); AdobeIllustrator (\*.ai); AutoCad (\*.dxf); Matlab (\*.ps, \*.pdf или экспорт в формат \*.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат \*.ai, \*.esp, \*.wmf, \*.emf, \*.svg;

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

#### Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [i.us.spb@gmail.com](mailto:i.us.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)