

АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2021

№ 3 (55)

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК России для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям.

Группа специальностей 05.11.00 «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы»:

- 05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки);
- 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям) (технические науки);
- 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

Группа специальностей 05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»:

- 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки);
- 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);
- 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах (технические науки);
- 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
- 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);
- 05.13.19 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки).

Журнал входит в базу данных Ulrich's Periodicals Directory.

Астрахань

Издательский дом «Астраханский университет»

2021

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Астраханского государственного университета

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ:
управление и высокие технологии
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2021
№ 3 (55)

Редакционная коллегия

И.М. Ажмухамедов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» Астраханского государственного университета (главный редактор)

И.В. Аникин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы информационной безопасности» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ

А.А. Большаков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и управления» Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

Ж.И. Батырканов, доктор технических наук, профессор, профессор Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (Кыргызская Республика, г. Бишкек)

С.Н. Гончаренко, доктор технических наук, профессор, профессор Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (г. Москва)

Л.А. Демидова, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительной и прикладной математики» Рязанского государственного радиотехнического университета (г. Рязань)

И.Ю. Квятковская, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета

А.Г. Кравец, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» Волгоградского государственного технического университета

В.Ю. Кузнецова, ассистент кафедры информационной безопасности Астраханского государственного университета (ответственный секретарь)

Ю.В. Литовка, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета

А.М. Лихтер, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая физика» Астраханского государственного университета

А.А. Лобатый, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск)

В.В. Морозов, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (г. Владимир)

Е.В. Никульчев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и моделирование систем» Московского технологического университета (МИРЭА) (г. Москва)

В.О. Осипян, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные технологии» Кубанского государственного университета (г. Краснодар)

И.Ю. Петрова, доктор технических наук, профессор, первый проректор Астраханского государственного архитектурно-строительного университета, заведующая кафедрой САПР Астраханского государственного архитектурно-строительного университета

А.В. Рыбаков, кандидат физико-математических наук, директор «Физико-математического института» Астраханского государственного университета; доцент кафедры электротехники, электроники и автоматики Астраханского государственного университета

А.В. Скрипаль, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Медицинская физика» Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

И.Б. Старченко, доктор технических наук, профессор, ООО «Параметрика», научный руководитель (г. Таганрог Ростовской области)

Ю.Ю. Тарасевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор Астраханского государственного университета, заведующий лабораторией «Математическое моделирование и информационные технологии в науке и образовании»

Т.Л. Тен, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» Карагандинского экономического университета (Республика Казахстан, г. Караганда)

Е.Н. Тищенко, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и защита информации» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ) – г. Ростов-на-Дону

М.А. Ураксеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника» Уфимского государственного авиационного технического университета

С.А. Филист, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Биомедицинская инженерия» Юго-Западного государственного университета (г. Курск)

Л.Р. Фиопова, доктор технических наук, профессор, декан факультета Вычислительной техники, заведующая кафедрой «Информационное обеспечение управления и производства» Пензенского государственного университета

В.А. Цимбал, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» (Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого МО в г. Серпухов Московской области)

Н.К. Юрков, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета

N.A. Kolesova, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science, University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS dept. and MBDS innovation lab (www.mbd-fr.org)

Журнал выходит 4 раза в год
Все материалы, поступающие в редколлегию журнала,
проходят независимое рецензирование

© Астраханский государственный университет,
Издательский дом «Астраханский университет», 2021
© Гайфитдинова С. Ю., дизайн обложки, 2021

ASTRAKHAN STATE UNIVERSITY

PRIKASPIYSKIY ZHURNAL:
Upravlenie i Vysokie Tekhnologii

CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2021
No. 3 (55)

The journal is included in the list of the reviewed scientific journals recommended by VAK of Russia for the publication of the main scientific results of theses for the candidate of science degree, for the doctor of science degree on the following scientific specialties.

Group of specialties 05.11.00 “Instrument engineering, measurement science, information and measuring devices and systems”:

05.11.01 – Instruments and measurement methods (by measurement types) (technical sciences);

05.11.16 – Information-measuring and control systems (by branches) (technical sciences);

05.11.17 – Medical instruments, systems and items (technical sciences).

Group of specialties 05.13.00 “Informatics, computer technique and control”:

05.13.01 – System analysis, information control and processing (by branches) (technical sciences);

05.13.05 – Components and devices of computational tools and control systems (technical sciences);

05.13.10 – Management in social and economic systems (technical sciences);

05.13.11 – Mathematical software and software for computing machines, computer systems and networks (technical sciences);

05.13.18 – Mathematical modelling, numerical methods and complexes of programmes (technical sciences);

05.13.19 – Information security methods and systems, information security (technical sciences).

The journal is included into the database Ulrich’s Periodicals Directory.

Astrakhan
Publishing House “Astrakhan University”
2021

Recommended by the Editorial and Publishing Board
of Astrakhan State University

**CASPIAN JOURNAL:
Control and High Technologies**

A SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

**2021
No. 3 (55)**

Editorial Board

I.M. Azhmukhamedov, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Security Department, Astrakhan State University
(Editor-in-Chief)

I.V. Anikin, Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Information Security System Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI»

A.A. Bolshakov, Doct. Sci. (Engineering), Professor of «Systems of Automated Design Engineering and Control» department, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

Zh.I. Batyrkanov, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razza-kov (Kyrgyz Republic, Bishkek)

S.N. Goncharenko, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the National University of Science and Technology «MISIS» (Moscow)

L.A. Demidova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Computational and Applied Mathematics Department, Ryazan State Radio Engineering University (Ryazan)

I.Yu. Kvyatkovskaya, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of «Information Technologies and Communications» Institute of the Astrakhan State Technical University

A.G. Kravets, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Automated Design Engineering Systems and Search Constructing Department, Volgograd State Technical University

V.Yu. Kuznetsova, assistant of Information Security Department, Astrakhan State University (Executive Editor)
Yu.V. Litovka, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Automated Support System for Decision-Making, Tambov State Technical University

A.M. Likhter, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of General Physics, Astrakhan State University

A.A. Lobaty, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of Information Systems and Technologies Department, Belarusian National Technical University (Belarus, Minsk)

V.V. Morozov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (Vladimir)

E.V. Nikulchev, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the System Management and Modeling Department, Moscow Technological University (Moscow)

V.O. Osipyan, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Kuban State University (Krasnodar)

I.Yu. Petrova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, First Vice-Rector of the Astrakhan State Architectural and Construction University, Head of the CAD department of Astrakhan State Architectural and Construction University

A.V. Rybakov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Institute of Physics and Mathematics, Astrakhan State University

A.V. Skripal, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Medical Physics Department of the Saratov national research State University named after N.G. Chernyshevsky

I.B. Starchenko, Doct. Sci. (Engineering), Professor, OOO «Parametrica» (Taganrog, Rostov Oblast), Research Supervisor

Yu.Yu. Tarasevich, Doct. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Astrakhan State University, head of the laboratory «Mathematical modeling and information technologies in science and education»

T.L. Ten, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Karaganda Economic University (Republic of Kazakhstan, Karaganda)

E.N. Tishchenko, Doct. Sci. (Economics), Professor, Head of the Information Technologies & Information Security Department, Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don

M.A. Urakseev, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Information and Measuring Equipment department of Ufa State Aviation Technical University

S.A. Filist, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Professor of Biomedical Engineering Department, Southwest State University (Kursk)

L.R. Fionova, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Dean of the Computer Technology Faculty, Head of the Department «Information Support of Management and Production, Penza State University

V.A. Tsimbal, Doct. Sci. (Engineering), Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Professor of the Automated Control Systems Department (Branch of the Military Academy of the Russian Strategic Missile Forces named after Peter the Great of the Moscow Oblast, Serpukhov, Moscow Oblast)

N.K. Yurkov, Honored worker of science of the Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, Head of the department «Designing and production of the radio equipment», Penza State University

N.A. Kolesova, PhD, Check Point Software Technologies LTD, Tel-Aviv, Israel

Serg Miranda, PhD (Toulouse University, France), – Master thesis at UCLA (University of California, Los Angeles with an INRIA Scholarship), Professor of Computer Science dept., University of Nice – Sophia Antipolis (Nice, France), Director of the CS department and MBDS innovation lab (www.mbds-fr.org)

The journal is published four times a year
All materials that come to the Editorial Board of the journal
are subject to independent peer-review

© Astrakhan State University,
Publishing House «Astrakhan University», 2021
© S. Yu. Gayfitdinova, cover design, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Е. А. Буракова

Информационная поддержка принятия решений
при производстве катализатора синтеза углеродных нанотрубок 9–15

Д. А. Черноморец

О погрешности скрытного субполосного внедрения данных
в цветные компоненты изображений 15–25

А. С. Гераськин, Р. В. Уколов

Исследование применения нейронных сетей
для восстановления поврежденных видеофайлов форматов AVI и MP4 25–32

О. В. Бородин, В. А. Егунов

Многопоточная обработка изображений
с использованием API Web-Workers 33–46

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Б. Р. Досмухамедов, В. Ю. Кузнецова

Методика оценки срока просрочки для решения задачи
кластеризации заемщиков микрофинансовых организаций 47–54

П. В. Попов, А. Г. Кравец

Алгоритм оценки уровня эффективности
логистической инфраструктуры региона 54–61

М. А. Кузнецов, П. Д. Кравченя, В. С. Скринкович, А. В. Володченков

Использование геоинформационных систем
для анализа привлекательности торговых точек города 62–71

И. М. Ажмухамедов, В. Ю. Кузнецова, А. В. Станишевская

Программный продукт для управления рисками
при использовании цифровой образовательной среды 72–81

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

И. В. Калиберда

Методы синтеза регуляторов для гидродинамических систем
управления с распределенными параметрами 82–89

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Амани Ахмад Саббаг, М. В. Щербаков

Анализ производительности протоколов
реактивной маршрутизации в VANET на базе NS3 90–97

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

С. Г. Попов, А. С. Крашенинников

Исследование алгоритма распараллеливания

определения путей в задаче группового управления роботами..... 98–109

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 110

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER TECHNIQUE AND CONTROL

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

E. A. Burakova

Information support for decision-making in the production
of the catalyst for the synthesis of carbon nanotubes 9–15

D. A. Chernomorets

On the error of hidden subband data embedding
into color components of images 15–25

A. S. Geraskin, R. V. Ukolov

Research on application of neural networks
for restoring damaged video files of AVI and MP4 formats 25–32

O. V. Borodin, V. A. Egunov

Multi-threaded frontend image processing
using Web-Workers API 33–46

MANAGEMENT IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

B. R. Dosmukhamedov, V. Yu. Kuznetsova

Methodology for estimating the delay time for solving the problem
of clusterization of borrowers of microfinance organizations 47–54

P. V. Popov, A. G. Kravets

Algorithm for assessing the level of efficiency
of the logistic infrastructure of the region 54–61

M. A. Kuznetsov, P. D. Kravchenya, V. S. Skrinkovich, L. V. Volodchenkov

Using a geographic information systems for analyzing
the attractiveness of urban trade location 62–71

I. M. Azhmukhamedov, V. Yu. Kuznetsova, A. V. Stanishevskaya

Risk management software
for using a digital educational environment 72–81

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM SYSTEMS

I. V. Kaliberda

Methods of synthesis of regulators for hydrodynamic control systems
with distributed parameters 82–89

MATHEMATICAL AND SOFTWARE FOR COMPUTER MACHINES, COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS

Ahmad Sabbagh Amani, M. V. Shcherbakov

Analysis of the performance
of reactive routing protocols in VANET based on NS3 90–97

**INSTRUMENT ENGINEERING, MEASUREMENT SCIENCE,
INFORMATION AND MEASURING DEVICES AND SYSTEMS**

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

S. G. Popov, A. S. Krashennnikov

Study the algorithm of paths calculation parallelization
in the problem of group control of robots 98–109

RULES FOR THE AUTHORS 110

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.21672/2074-1707.2021.55.3.009-015
УДК 658.5.011

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАТАЛИЗАТОРА СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Статья поступила в редакцию 28.05.2021, в окончательном варианте – 29.06.2021.

Буракова Елена Анатольевна, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0001_8927_7433, e-mail: elenburakova@yandex.ru

Цель исследования – разработка информационной системы сопровождения и поддержки принятия решений в производстве металлоксидного катализатора, обеспечивающего направленный синтез углеродных нанотрубок методом газофазного химического осаждения. Для достижения цели были решены следующие задачи: разработан новый подход к процессу получения катализатора методом термического разложения неустойчивых соединений для синтеза углеродных нанотрубок; проведены экспериментальные исследования влияния пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников физическим воздействием (ультразвук, электромагнитное и микроволновое поле и др.); получены аппроксимирующие зависимости характеристик синтезируемых углеродных наноструктур от параметров процесса пред- и посттермической обработки катализатора, которые использовались при создании модуля рекомендаций. На основе полученных результатов были разработаны блок сопровождения производства и модуль рекомендаций, используемые при создании системы сопровождения и поддержки принятия решений производства катализатора для синтеза углеродных нанотрубок. Применение разработанной информационной системы сопровождения и поддержки принятия решений позволяет формировать катализатор, позволяющий синтезировать углеродные нанотрубки с заданными характеристиками. Также использование данной информационной системы при производстве катализатора способствует расширению ассортимента синтезируемой нанопроductии в процессе газофазного химического осаждения без изменения состава катализатора.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, система сопровождения производства, катализатор, метод газофазного химического осаждения, направленный синтез углеродных нанотрубок

INFORMATION SUPPORT FOR DECISION-MAKING IN THE PRODUCTION OF THE CATALYST FOR THE SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES

The article was received by the editorial board on 28.05.2021, in the final version – 29.06.2021.

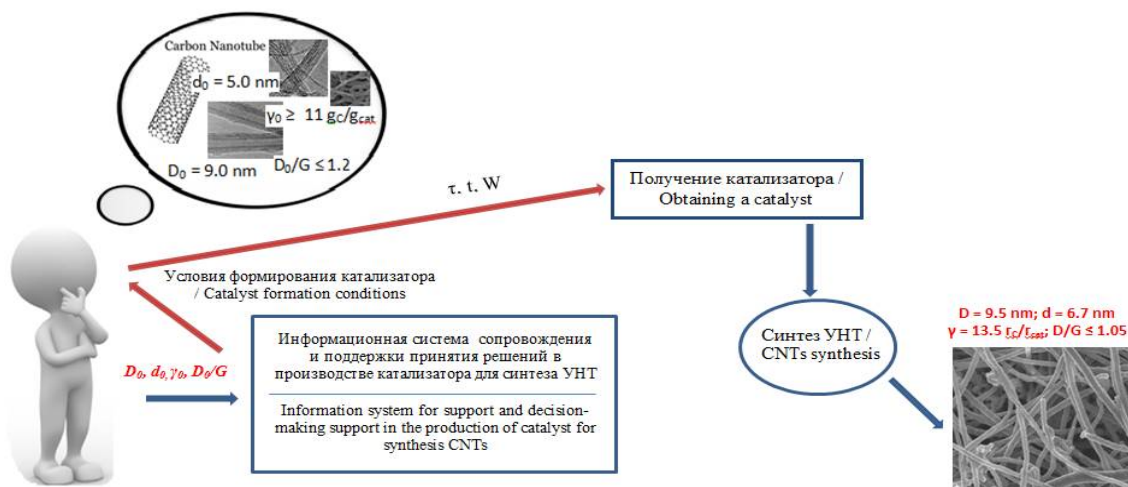
Burakova Elena A., Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0001_8927_7433, e-mail: elenburakova@yandex.ru

The aim of the study is to develop information systems for supporting and supporting decision-making in the production of a metal oxide catalyst that provides targeted synthesis of carbon nanotubes by gas-phase chemical deposition. To achieve the goal, the following tasks were solved: a new approach to the process of creating a catalyst for the thermal decomposition of unstable compounds for synthetic nanotubes was developed; experimental studies of the effect on the post-thermal treatment of the catalyst and its precursors by physical action (ultrasonic, electromagnetic and microwave fields, etc.), which were obtained the approximating characteristics of the synthesized models of carbon nanostructures on the parameters of the process of pre- and post-thermal treatment of the catalyst were used to create a recommendation module. On the basis of the results obtained, blocks of implementation and technologies were developed, used in the creation of a system for maintaining and supporting solutions for the production of a catalyst for synthetic nanotubes. The application of the developed system of maintenance and support of decisions makes it possible to form a catalyst that makes it possible to synthesize carbon nanotubes with specified characteristics. Also, the use of this information system in the production of a catalyst helps to expand the range of synthesized nanoproducts in the process of gas-phase chemical deposition without changing the composition of the catalyst.

Keywords: decision support system, production tracking system, catalyst, chemical vapor deposition method, directed synthesis of carbon nanotubes

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. В настоящее время углеродные нанотрубки (УНТ) широко используются в различных областях науки и техники. Однако для каждой области применения необходимы УНТ с определенными характеристиками [2, 8, 13, 14]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных разработке катализаторов и синтезу УНТ на них, до сих пор актуальной остается проблема реализации синтеза наноструктур с заданными характеристиками (направленный синтез), что обусловлено отсутствием общей теории формирования УНТ на частице катализатора.

Анализ современного состояния науки и техники промышленного производства УНТ методом газофазного химического осаждения (ГФХО) выявил тенденцию, заключающуюся в строгом соотношении состава катализатора и морфологии синтезированных наноструктур (один состав катализатора – один тип УНТ). Такой подход создает трудности при расширении ассортимента синтезируемой нанопродукции, так как требует новых рецептур катализаторов, методик их получения, а, зачастую, и специализированного оборудования. Возможность гибкого управления процессом формирования УНТ на катализаторе открывает новые производственные возможности. В настоящее время характеристиками синтезируемых УНТ управляют путем изменения состава катализатора и условий ГФХО. Исходя из того, что между диаметральными размерами УНТ и размерами частиц активного компонента катализатора наблюдается корреляция [11, 12, 6], можно сделать вывод о том, что через процесс получения катализатора также можно управлять процессом формирования нанотрубок. Поэтому при производстве катализатора необходимо уделять внимание не только составу, но и способу его получения.

Предварительное исследование процесса получения катализатора методом термического разложения неустойчивых соединений [9, 10] показало, что через реализацию предтермической обработки его предшественника (раствора исходных компонентов катализатора) физическим воздействием (ультразвук, электромагнитное поле и др.) можно для одного состава катализатора формировать каталитические системы с разными свойствами. Физические методы воздействия используются при получении различных катализаторов, в частности для гидрирования [5], реакции дейтеро-водородного обмена [7], но не применяются при производстве катализаторов синтеза УНТ. Применение физических воздействий в процессе получения катализатора для синтеза УНТ может быть использовано с целью их активации и управления формированием каталитических систем синтеза УНТ.

Современное производство, в том числе и катализаторов для синтеза УНТ, сложно представить без использования информационных технологий. Накопленный объем знаний и информации о процессах формирования катализаторов и их характеристиках требует обобщения и систематизации для эффективного использования при разработке производства катализатора синтеза УНТ в промышленных масштабах. Для обобщения знаний, своевременного реагирования на новые знания об изменениях, происходящих в процессе формирования УНТ, и дальнейшего совершенствования их производства методом ГФХО необходима информационная поддержка на всех стадиях получения нанопродукта.

Так как катализатор является источником зарождения и роста УНТ, то создание информационной системы сопровождения (ИСС) и поддержки принятия решения (СППР) при его промышленном производстве может позволить осуществлять в процессе синтеза гибкое управление формированием УНТ. Одним из примеров, подтверждающих эффективность использования ИС при подборе катализатора на основе высокопористых ячеистых материалов для конкретного технологического процесса

без проведения экспериментов, является ИС «InfoKat» [3]. Обзор существующих ИС выявил отсутствие систем для подбора режимных параметров формирования катализатора синтеза УНТ, в связи с чем целью работы являлась разработка СППР производства катализатора, обеспечивающей получение информации, необходимой для реализации направленного синтеза наноструктур.

Разработка информационной СППР, предусматривающей управление информационными потоками, упрощение поиска необходимой информации и отсеивание неактуальной информации [1] в производстве катализатора, позволит определить условия его формирования, способствующие получению каталитической системы, обеспечивающей направленный синтез УНТ.

Информационная система сопровождения и поддержки принятия решений в производстве катализатора. В работе были успешно решены следующие задачи: разработан новый подход к управлению процессом формирования катализатора синтеза углеродных наноструктур; экспериментально исследовано влияние пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников физическим воздействием; получены аппроксимирующие зависимости характеристик синтезируемых УНТ от параметров процесса формирования каталитической системы, необходимые для создания модуля рекомендаций; созданы блок сопровождения производства и модуль рекомендаций; разработана СППР производства катализатора для направленного синтеза углеродных наноструктур.

В данной работе впервые был разработан и использован при создании информационной СППР новый подход к управлению качественными и количественными характеристиками металлоксидного катализатора для синтеза УНТ, основанный на пред- и посттермической его обработке ультразвуковым, электромагнитным, микроволновым полем и прокаливанием в процессе получения. Схема управления процессом формирования катализатора, обеспечивающего направленный синтез УНТ, представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема управления процессом формирования катализатора синтеза УНТ

В рамках предлагаемого научного подхода, управление формированием катализатора может осуществляться не только за счет варьирования состава катализатора, но и в первую очередь за счет пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников физическим воздействием. Таким образом, используемые физические воздействия в процессе формирования катализатора в первую очередь направлены на получение катализатора, позволяющего синтезировать УНТ с заданными характеристиками. Организовать управление процессом формирования катализатора можно, используя решение оптимизационной задачи, позволяющей найти такие условия получения каталитической системы (тип физического воздействия и условия пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников), при которых будет обеспечен синтез УНТ с характеристиками наиболее близкими к заданным.

При разработке СППР был использован метод анализа иерархий [4], дающий возможность оценить все возможные варианты организации процесса формирования катализатора по результатам решения оптимизационной задачи. Окончательный выбор варианта осуществляется ЛПР.

На основе вышеизложенного была разработана ИС, выполняющая следующие функции:

- учет исходного сырья;
- ведение электронных журналов анализа физико-химических свойств сырья;
- ведение технологической карты;
- ведение электронных журналов анализа физико-химических свойств катализатора;
- учет хранения готового катализатора;
- рекомендации технологических режимов получения катализатора с характеристиками, обеспечивающими направленный синтез УНТ.

Разработанная ИС содержит блок сопровождения производства и модуль рекомендаций. При создании блока сопровождения производства катализатора был использован программный продукт SupraSoft 1.10, а при создании блока поддержки принятия решения (Блок рекомендаций) – Borland Delphi 7. Структурная схема разработанной ИС представлена на рисунке 2.

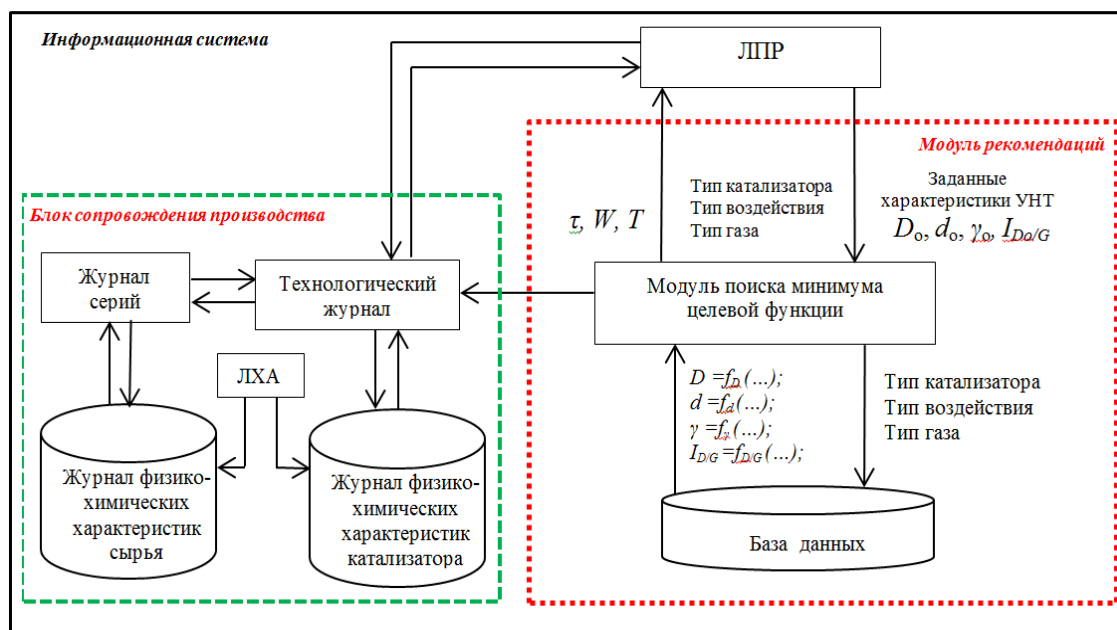


Рисунок 2 – Структурная схема ИС сопровождения и СППР: τ – время; T – температура; W – удельная мощность физического воздействия на катализатор и его предшественники; $D, d, \gamma, D/G$ – расчетные значения внешнего и внутреннего диаметра, удельного выхода и степени дефектности УНТ соответственно; ЛХА – лаборант химического анализа

Разработанная ИС содержит журналы серий, журналы физико-химических характеристик сырья и катализатора и модуль выработки рекомендаций. ЛПР через интерфейс блока «Технологический журнал» создает технологическую карту будущей партии катализатора. Затем вызвав блок «Модуль рекомендаций» ЛПР передает ожидаемые характеристики синтезируемых УНТ, вид используемых углеродсодержащих газов, рецептур катализатора и способов физического воздействия модулю поиска минимума целевой функции. Целевая функция характеризует степень отклонения параметров синтезируемых УНТ от ожидаемых/заданных значений. Общий вид рабочего окна модуля рекомендаций представлен на рисунке 3.

Рисунок 3 – Общий вид рабочего окна модуля рекомендаций

Модуль поиска минимума целевой функции в соответствии со структурой иерархической базы данных перебирает все допустимые варианты соотношений «Тип катализатора» – «Тип воздействия» – «Тип газа» и для каждого варианта из базы данных передает набор зависимостей: $D = f_D(\dots)$; $d = f_d(\dots)$; $\gamma = f_\gamma(\dots)$; $D/G = f_{D/G}(\dots)$ в виде аппроксимирующих функций от τ , T и W , полученных в результате обработки экспериментальных данных. Методом сканирования определяется минимум целевой функции и сохраняются значения условий пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников физическим воздействием для данной комбинации соотношений «Тип катализатора» – «Тип воздействия» – «Тип газа». Далее процедура обращения модуля поиска минимума целевой функции к базе данных повторяется для всех вариантов, в результате чего выстраивается последовательность режимов, отсортированная по возрастанию целевой функции. Данный рейтинг предоставляется ЛПР для выбора конкретного режима, после чего он передается в блок «Технологический журнал» ИС.

На следующем этапе в технологической карте указывается номер серии катализатора. Серия формируется путем компоновки карточек исходного сырья, содержащих результаты физико-химических характеристик используемых веществ. Результаты на вновь поступившее сырье в ИС вносит ЛХА. Далее ЛПР, с учетом выбранного режима, реализует процесс получения катализатора, осуществляя отбор проб промежуточных продуктов и исследование их физико-химических характеристик, заносит их в технологическую карту. По окончании процесса формирования катализатора ЛХА отбирает пробы и проводит их диагностику, полученные результаты также заносит в базу данных блока «Журнал физико-химических характеристик катализатора».

База данных в ИС реализована в виде текстового файла заданной структуры, что позволяет легко вводить в нее данные других рецептов катализатора и результаты исследования новых физических воздействий на них и при этом не требует сложных систем обслуживания. Модуль рекомендаций активно использует базу данных в процессе решения оптимизационной задачи. При выборе типа физического воздействия указываются зависимости характеристик синтезированных УНТ от условий реализации процесса получения катализатора. Таким образом, ИС при запуске использует заголовки рецептов катализаторов, типов газов и способов воздействия для формирования списка вариантов, предоставляемого ЛПР.

Разработанная проблемно-ориентированная система сопровождения и поддержки принятия решения была апробирована в ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов). Были найдены условия получения катализатора, обеспечивающего синтез коаксиальных УНТ с заданными характеристиками ($D_0 = 9,0$ нм; $d_0 = 5,0$ нм; $\gamma_0 \geq 11$ г/г_{кат}, $D_0/G \leq 1,2$). В результате расчета модуль рекомендовал применение катализатора состава Co-Mo/Al₂O₃-MgO, полученного с использованием посттермической обработки металлоксидной системы при температуре 600 °C в течение часа в присутствии дополнительной подачи воздуха. Использование полученного при найденных режимах Co-Mo/Al₂O₃-MgO катализатора в процессе ГФХО (углеродсодержащий газ – C₃H₈-C₄H₁₀) приводит к формированию УНТ ($D = 9,5$ нм; $d = 6,7$ нм; $\gamma = 13,5$ г/г_{кат}, $D/G \leq 1,05$).

Заключение. В настоящее время проблема реализации направленного синтеза УНТ методом ГФХО стала весьма актуальной, так как после открытия УНТ основное внимание уделялось изучению их свойств и освоению промышленного производства, а не изучению механизмов формирования

наноструктур и способов управления этим процессом. Неизученность механизмов формирования УНТ на частицах катализатора и разрозненность имеющейся информации (множество рецептов катализаторов для синтеза УНТ) не позволяют решить проблему реализации направленного синтеза УНТ. В данной работе представлен новый подход к управлению процессом формирования углеродных наноструктур не через состав катализатора, а через пред- и посттермическую обработку катализатора и его предшественников физическим воздействием. Проведенные экспериментальные исследования доказали возможность управления процессом синтеза УНТ с использованием предлагаемого подхода, позволили определить аппроксимирующие зависимости и на их основе разработать специальное математическое обеспечение, устанавливающее связь между условиями физического воздействия на катализатор/его предшественники и характеристиками нанопродукта, которое использовалось в качестве основы при создании СППР. В результате чего была разработана ИС сопровождения и СППР при производстве катализатора синтеза УНТ, позволяющая обеспечить направленный синтез наноструктур методом ГФХО на катализаторе. Использование в производстве УНТ разработанной СППР позволит не только решить проблему реализации их направленного синтеза, но и расширить ассортимент производимой нанопродукции без изменения состава катализатора.

Библиографический список

1. Головицына, М. В. Информационные технологии в экономике : учебное пособие / М. В. Головицына. – М. : Саратов : ИНТУИТ ; Ай Пи Ар Медиа, 2020. – 589 с.
2. Литовка, Ю. В. Процесс получения наномодифицированных цинковых покрытий с повышенной равномерностью / Ю. В. Литовка, Д. Н. Симагин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 4. – С.886–889.
3. Прокудин, С. В. Разработка информационной системы выбора и расчета катализаторов на основе ВПЯМ / С. В. Прокудин, А. В. Беспалов, В. Н. Грунский, А. И. Козлов // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. XXI, № 2 (70). – С. 79–84.
4. Рыбак, В. А. Аналитический обзор и сравнение существующих технологий поддержки принятия решений / В. А. Рыбак, Шокар Ахмад // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 3. – С. 12–18.
5. Сульман, М. Г. Влияние ультразвука на каталитические процессы / М. Г. Сульман // Успехи химии. – 2000. – Т. 69, № 2. – С. 178–191.
6. Царева, С. Ю. Исследования влияния природы и размера частиц катализатора на образование нанотрубок в методе каталитического пиролиза углеводородов / С. Ю. Царева, Е. В. Жариков, А. Н. Коваленко // Научные технологии. – 2004. – № 6. – С. 38–42.
7. Шелимов, Б. Н. Нетрадиционные методы активации оксидных катализаторов с нанесенными ионами переходных металлов / Б. Н. Шелимов // Российский химический журнал. – 2000. – Т. 44, вып. 1. – С. 57–70.
8. Ali, J. Ali. Thermophysical Properties of Nanomodified Liquids / Ali J. Ali, E. N. Tugolukov, L. J. Habeeb // Advanced Materials & Technologies. – 2020. – № 1 (17). – P. 18–26.
9. Burakova, E. A. Effect of Ultrasound on a Mixed Oxide-Based Catalyst in the Synthesis of Carbon Nanostructured Materials / E. A. Burakova, E. V. Galunin, A. V. Rukhov, N. R. Memetov, A. G. Tkachev // Research on Chemical Intermediates. – 2016. – № 42 (9). – P. 7045–7055.
10. Burakova, E. A. Novel and Economic Method of Carbon Nanotubes Synthesis on a Nickel Magnesium Oxide Catalyst Using Microwave Radiation / E. A. Burakova, T. P. Dyachkova, A. V. Rukhov, E. N. Tugolukov, E. V. Galunin, A. G. Tkachev, A. A. Basheer, Al. Imran // Journal of Molecular Liquids. – 2018. – Vol. 253. – P. 340–346.
11. Cheung, C. L. Carbon Nanotube Atomic Force Microscopy Tips: Direct Growth by Chemical Vapor Deposition and Application to High-Resolution Imaging / C. L. Cheung, J. H. Hafner, C. M. Lieber // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2000. – № 97 (8). – P. 3809–3813.
12. Ding, F. Molecular Dynamics Study of the Catalyst Particle Size Dependence on Carbon Nanotube Growth / F. Ding, A. Rosen, K. Bolton // Journal of Chemical Physics. – 2004. – № 121 (6). – P. 2775–2779.
13. Dyachkova, T. P. Effects of the Nature of Oxidant and Synthesis Conditions on Properties of Nanocomposites Ppolyaniline/Carbon Nanotubes / T. P. Dyachkova, A. V. Melezhyk, Zh. G. Morozova, A. V. Shuklinov, A. G. Tkachev // Transactions TSTU. – 2012. – Vol. 18, № 3. – P. 718–730.
14. Nasraoui, M. The Effect of Combinations of Carbon Nanomaterials on the Microhardness of the Chromium Galvanic Coating / M. Nasraoui, Yu. V. Litovka, V. Yu. Dolmatov // Advanced Materials & Technologies. – 2020. – № 3 (19). – P. 56–63.

References

1. Golovitsyna, M. V. *Informatsionnyye tekhnologii v ekonomike : uchebnoye posobiye* [Information technology in the economy : tutorial]. Moscow ; Saratov, INTUIT Publ. ; Ay Pi Ar Media Publ., 2020. 589 p.
2. Litovka, Yu. V., Simagin, D. N. *Protsess polucheniya nanomodifitsirovannykh tsinkovykh pokrytiy s povyshennoy ravnomernostyu* [The process of obtaining nanomodified zinc coatings with increased uniformity]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov State Technical University], 2013, vol. 19, no. 4, pp. 886–889.
3. Prokudin, S. V., Bepalov, A. V., Grunskiy, V. N., Kozlov, A. I. *Razrabotka informatsionnoy sistemy vybora i rascheta katalizatorov na osnove VPYAM* [Development of an information system for the selection and calculation

of catalysts based on HPCM]. *Uspekhi v khimii i khimicheskikh tekhnologiyakh* [Advances in chemistry and chemical technology], 2007, vol. XXI, no. 2 (70), pp. 79–84.

4. Rybak, V. A., Akhmad Shokr. Analiticheskiy obzor i sravneniye tekhnologiy podderzhki prinyatiya resheniy [Analytical review and comparison of existing decision support technologies]. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [Systems Analysis and Applied Informatics], 2016, no. 3, pp. 12–18.

5. Sulman, M. G. Vliyaniye ultrazvuka na kataliticheskiye protsessy [Influence of ultrasound on catalytic processes]. *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry], 2000, vol. 69, no. 2, pp. 178–191.

6. Tsareva, S. Yu., Zharikov, Ye. V., Kovalenko, A. N. Issledovaniya vliyaniya prirody i chastits katalizatora na obrazovaniye nanotrubok v metode kataliticheskogo piroliza uglevodorodov [Investigation of the influence of the nature and size of catalyst particles on the formation of nanotubes in the method of catalytic pyrolysis of hydrocarbons]. *Naukoyemkiye tekhnologii* [Science-Intensive Technologies], 2004, no. 6, pp. 38–42.

7. Shelimov, B. N. Netraditsionnyye metody aktivatsii oksidnykh katalizatorov s nanesennymi ionami perekhodnykh metallov [Unconventional Methods for Activating Oxide Catalysts with Supported Transition Metal Ions]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2000, vol. 44, no. 1, pp. 57–70.

8. Ali, J. Ali, Tugolukov, E. N., Habeeb, L. J. Thermophysical Properties of Nanomodified Liquids. *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 1 (17), pp. 18–26.

9. Burakova, E. A., Galunin, E. V., Rukhov, A. V., Memetov, N. R., Tkachev, A. G. Effect of Ultrasound on a Mixed Oxide-Based Catalyst in the Synthesis of Carbon Nanostructured Materials. *Research on Chemical Intermediates*, 2016, no. 42 (9), pp. 7045–7055.

10. Burakova, E. A., Dyachkova, T. P., Rukhov, A. V., Tugolukov, E. N., Galunin, E. V., Tkachev, A. G., Basheer, A. A., Imran, Al. Novel and Economic Method of Carbon Nanotubes Synthesis on a Nickel Magnesium Oxide Catalyst Using Microwave Radiation. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, no. 253, pp. 340–346.

11. Cheung, C. L., Hafner, J. H., Lieber, C. M. Carbon Nanotube Atomic Force Microscopy Tips: Direct Growth by Chemical Vapor Deposition and Application to High-Resolution Imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, no. 97 (8), pp. 3809–3813.

12. Ding F., Rosen A., Bolton K. Molecular Dynamics Study of the Catalyst Particle Size Dependence on Carbon Nanotube Growth. *Journal of Chemical Physics*, 2004, no. 121 (6), pp. 2775–2779.

13. Dyachkova, T. P., Melezhyk, A. V., Morozova, Zh. G., Shuklinov, A. V., Tkachev, A. G. Effects of the Nature of Oxidant and Synthesis Conditions on Properties of Nanocomposites Ppolyaniline/Carbon Nanotubes. *Transactions TSTU*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 718–730.

14. Nasraoui, M., Litovka, Yu. V., Dolmatov, V. Yu. The Effect of Combinations of Carbon Nanomaterials on the Microhardness of the Chromium Galvanic Coating. *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 3 (19), pp. 56–63.

УДК 621.397

О ПОГРЕШНОСТИ СКРЫТНОГО СУБПОЛОСНОГО ВНЕДРЕНИЯ ДАННЫХ В ЦВЕТОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 16.06.2021, в окончательном варианте – 18.06.2021.

Черноморец Дарья Андреевна, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85, аспирант, ORCID: 0000-0002-9626-9455, e-mail: daria013ch@yandex.ru

Работа посвящена исследованию проблемы скрытного внедрения данных в цветные цифровые изображения, актуальность которой обусловлена необходимостью организации контроля за распространением и использованием, например, авторских цифровых фотографий. В работе приведены основные положения метода скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования, основанного на относительном изменении (с учетом значений внедряемых данных) проекций изображения-контейнера, представленного в оттенках серого, на собственные векторы субполосных матриц косинус преобразования. Данный метод предложено применять для внедрения данных в цветное изображение на основании внедрения данных в его отдельную цветовую компоненту широко используемых при обработке изображений цветковых пространств RGB, HSV и YCbCr. В работе предложены соотношения для оценивания погрешности цветного изображения, содержащего внедренные данные. Проведены вычислительные эксперименты, которые продемонстрировали, что скрытное субполосное внедрение данных в различные цветовые компоненты может вызывать существенно отличающиеся значения погрешностей изображений-контейнеров, а также, что учет частотных субполосных свойств изображений при скрытном внедрении данных на основе рассмотренного метода в цветовые компоненты изображений, представленных в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr, позволяет достигнуть незначительных искажений (погрешности) цветных изображений-контейнеров.

Ключевые слова: скрытное внедрение, цветное изображение-контейнер, субполосные матрицы, собственные векторы, проекция изображения, погрешность

ON THE ERROR OF HIDDEN SUBBAND DATA EMBEDDING INTO COLOR COMPONENTS OF IMAGES

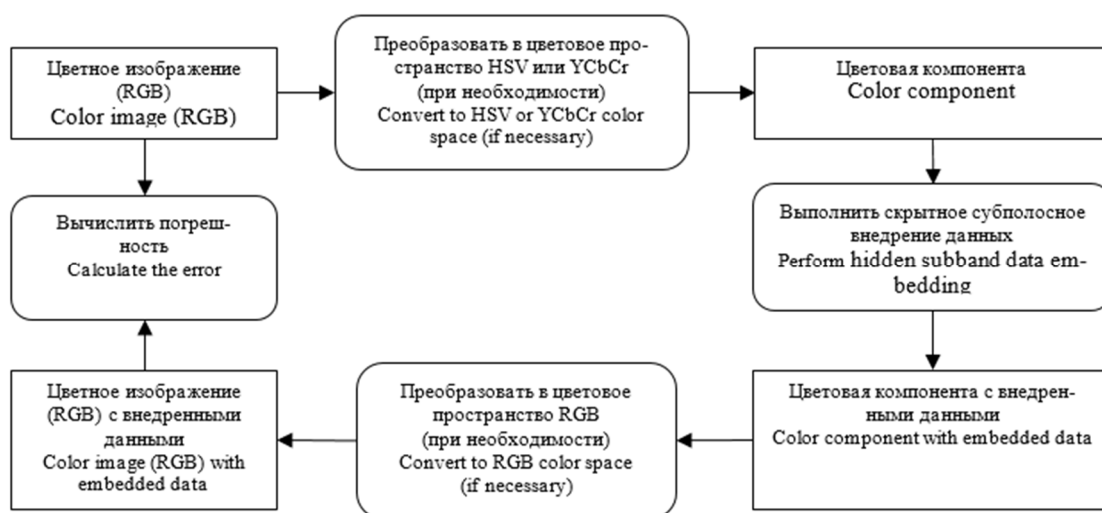
The article was received by the editorial board on 16.06.2021, in the final version – 18.06.2021.

Chernomorets Daria A., Belgorod National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russian Federation,
post-graduate student, ORCID: 0000-0002-9626-9455, e-mail: daria013ch@yandex.ru.

The work is devoted to the study of the problem of hidden data embedding into color digital images, the relevance of which is due to the need to organize control over the distribution and use of, for example, author's copyright digital photos. The paper presents the main ideas of the method of hidden subband data embedding into images within the cosine transform, based on the relative change (taking into account the values of the embedded data) of the projections of the container-image, represented in grayscale, on the cosine transform subband matrices eigenvectors. This method is proposed to be used for data embedding in a color image based on data embedding in its separate color component of the RGB, HSV, and YCbCr color spaces widely used in image processing. In this paper, we propose relations for estimating the error of a color image containing embedded data. Computational experiments have been carried out to demonstrate that hidden subband embedding of data in different color components can cause significantly different values of errors in container-images, and that taking into account the frequency subband image properties during the hidden data embedding (based on the considered method) into the color components of images represented in the RGB, HSV, and YCbCr color spaces allows achieving insignificant distortions (errors) of the color container-images.

Keywords: hidden embedding, color container-image, subband matrices, eigenvectors, image projection, error

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Цветные изображения представляют значительную часть цифровых изображений, регистрируемых, обрабатываемых и распространяемых в информационных системах. Цифровые изображения, зачастую, содержат информацию, использование и распространение которой необходимо контролировать, например, во многих случаях необходимо организовывать контроль за распространением или использованием авторских цифровых фотографий, созданных средствами компьютерной графики цифровых картин, изображений земной поверхности, электронных карт, схем, чертежей, фото и видео материалов и других мультимедийных данных. В настоящее время один из подходов к организации такого контроля основан на применении цифровых «водяных знаков», то есть данных, скрытно внедряемых в изображения, при этом искажения изображений с внедренными данными визуально не обнаруживаются. Под скрытным внедрением понимают такое изменение элементов изображения на основе скрываемой информации, которое не вызывает существенных искажений исходного изображения и обеспечивает восстановление внедренных данных [1–4].

Значительное количество методов скрытного внедрения (стеганографических методов) основано на скрытии информации в изображениях, представленных в оттенках серого (значения пикселей изменяются в диапазоне от 0 до 255) [1–3, 5–7]. Данные методы также могут быть применены для скрытного внедрения в цветные изображения путем внедрения данных в отдельные цветовые компоненты цветных изображений, например, в компоненты R, G и B, содержащих информацию

соответственно о красном, зеленом и синем цветах цветного изображения, представленного в цветовом пространстве RGB [2, 3, 8].

В данной работе проведены исследования по оцениванию влияния на искажение (погрешность) цветного изображения результатов скрытного внедрения данных в отдельные цветовые компоненты широко используемых цветовых пространств RGB, HSV и YCbCr [8]. При этом скрытное внедрение данных осуществлено на основе достаточно эффективного метода скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования, являющимся развитием метода субполосного внедрения в рамках преобразования Фурье [9–12]. В данном методе учитываются частотные свойства изображений, в которые осуществляется внедрение, что позволяет получать незначительные искажения исходных изображений в результате внедрения данных.

Основные положения метода скрытного субполосного внедрения. Метод скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования основан на относительном изменении (с учетом значений внедряемых данных) проекций изображения-контейнера, представленное в оттенках серого, на собственные векторы так называемых субполосных матриц косинус преобразования, соответствующих заданной подобласти пространственных частот, на которые разбивается область определения косинус преобразования.

Обозначим, $\Phi = (f_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, – изображение-контейнер, представленное в оттенках серого, в которое предполагается осуществлять внедрение данных, представленных в битовой форме. Представим область определения косинус преобразования в виде объединения $R_1 \times R_2$ непересекающихся подобластей пространственных частот $V_{r_1 r_2}$, $r_1 = 1, 2, \dots, R_1$, $r_2 = 1, 2, \dots, R_2$:

$$V_{r_1 r_2} = \{(u, v) | u_{r_1,1} \leq u < u_{r_1,2}, \quad v_{r_2,1} \leq v < v_{r_2,2}\}, \quad (1)$$

$$u_{1,1} = 0, \quad u_{1,2} = \frac{\pi}{R_1}, \quad u_{r_1,1} = u_{r_1-1,2}, \quad u_{r_1,2} = u_{r_1,1} + \frac{\pi}{R_1}, \quad r_1 = 2, \dots, R_1, \quad (2)$$

$$v_{1,1} = 0, \quad v_{1,2} = \frac{\pi}{R_2}, \quad v_{r_2,1} = v_{r_2-1,2}, \quad v_{r_2,2} = v_{r_2,1} + \frac{\pi}{R_2}, \quad r_2 = 2, \dots, R_2. \quad (3)$$

Элементы субполосных матриц $G_{r_1} = (g_{i,k_1}^{r_1})$, $i, k_1 = 1, 2, \dots, N_1$, и $H_{r_2} = (h_{i_2,k_2}^{r_2})$, $i_2, k_2 = 1, 2, \dots, N_2$, применяемых в рассматриваемом методе скрытного субполосного внедрения данных в изображения и соответствующих заданной подобласти пространственных частот $V_{r_1 r_2}$, вычисляются на основании следующих соотношений [13, 14]:

$$g_{in}^{r_1} = a_{in}^{r_1} + \tilde{g}_{in}^{r_1}. \quad (4)$$

$$a_{in}^{r_1} = \begin{cases} \frac{\sin(u_{r_1,2}(i-n)) - \sin(u_{r_1,1}(i-n))}{\pi(i-n)}, & i \neq n, \\ \frac{u_{r_1,2} - u_{r_1,1}}{\pi}, & i = n, \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{g}_{in}^{r_1} = \frac{\sin(u_{r_1,2}(i+n-1)) - \sin(u_{r_1,1}(i+n-1))}{\pi(i+n-1)}. \quad (6)$$

Элементы матрицы $H_{r_2} = (h_{i_2,k_2}^{r_2})$, $i_2, k_2 = 1, 2, \dots, N_2$, вычисляются аналогично элементам матрицы G_{r_1} при подстановке значений частот $v_{r_2,1}$ и $v_{r_2,2}$ (3) в соотношения (4)–(6).

Проекция $\gamma_{ik}^{r_1 r_2}$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $k = 1, 2, \dots, N_2$, изображения Φ на собственные вектора $q_i^{r_1}$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, и $u_k^{r_2}$, $k = 1, 2, \dots, N_2$, субполосных матриц косинус преобразования G_{r_1} и H_{r_2} вычисляются следующим образом:

$$\gamma_{ik}^{r_1 r_2} = (\tilde{q}_i^{r_1})^T \Phi \tilde{u}_k^{r_2}, \quad (7)$$

и затем разбиваются на подмножества проекций $\Psi_{s_1 s_2}$, $s_1 = 1, 2, \dots, S_1$, $s_2 = 1, 2, \dots, S_2$, следующего вида:

$$\Psi_{s_1 s_2} = \{\gamma_{ik}^{r_1 r_2} | (s_1 - 1)N_1 / S_1 + 1 \leq i \leq s_1 N_1 / S_1, (s_2 - 1)N_2 / S_2 + 1 \leq k \leq s_2 N_2 / S_2\}. \quad (8)$$

Для скрытного внедрения выбираются неинформативные подмножества проекций, для которых выполняется неравенство:

$$\delta_{s_1 s_2} < T_0, \quad (9)$$

где T_0 – пороговое значение, вычисляемое на основании задаваемой (интерактивно или на основе применения интеллектуальных технологий) величины доли T_p суммы квадратов проекций (доли квадрата нормы матрицы изображения-контейнера), входящих в информативные подмножества проекций, не рекомендуемых для изменения при внедрении,

$$0 < T_p < 1, \quad (10)$$

$\delta_{s_1 s_2}$ – доля суммы квадратов проекций, входящих в подмножество $\Psi_{s_1 s_2}$:

$$\delta_{s_1 s_2} = \sum_{i=(s_1-1)N_1/S_1+1}^{s_1 N_1/S_1} \sum_{k=(s_2-1)N_2/S_2+1}^{s_2 N_2/S_2} (\gamma_{ik}^{r_1 r_2})^2 / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} (\gamma_{ik}^{r_1 r_2})^2. \quad (11)$$

В рассматриваемом методе относительное изменение значений заданной пары неинформативных проекций $\gamma_{ik}^{r_1 r_2}$ и $\gamma_{i,k+1}^{r_1 r_2}$ при внедрении «0» или «1» осуществляется таким образом, чтобы для измененных значений проекций $\tilde{\gamma}_{ik}^{r_1 r_2}$ и $\tilde{\gamma}_{i,k+1}^{r_1 r_2}$ выполнялись соответственно следующие неравенства:

$$|\tilde{\gamma}_{ik}^{r_1 r_2}| \geq |\gamma_{i,k+1}^{r_1 r_2}| + T_\gamma^{s_1 s_2} \quad (\text{при внедрении «0»}), \quad (12)$$

$$|\tilde{\gamma}_{ik}^{r_1 r_2}| \leq |\gamma_{i,k+1}^{r_1 r_2}| - T_\gamma^{s_1 s_2} \quad (\text{при внедрении «1»}), \quad (13)$$

где $T_\gamma^{s_1 s_2}$ – пороговое значение отличия проекций,

$$T_\gamma^{s_1 s_2} = t_\gamma \gamma_{cp}^{s_1 s_2}, \quad (14)$$

$$\gamma_{cp}^{s_1 s_2} = \sqrt{\sum_{i=(s_1-1)N_1/S_1+1}^{s_1 N_1/S_1} \sum_{k=(s_2-1)N_2/S_2+1}^{s_2 N_2/S_2} (\gamma_{ik}^{r_1 r_2})^2 / \left(\frac{N_1}{S_1} \frac{N_2}{S_2} \right)}, \quad (15)$$

t_γ – коэффициент относительного изменения проекций, задаваемый интерактивно или на основе применения интеллектуальных технологий и позволяющий уточнять пороговое значение $T_\gamma^{r_1 r_2}$,

$$t_\gamma \geq 0. \quad (16)$$

Изменение изображения-контейнера Φ на основе значений пары измененных проекций выполняется следующим образом:

$$\tilde{\Phi} = \Phi + (T_S \tilde{\gamma}_{ik}^{r_1 r_2} - \gamma_{ik}^{r_1 r_2}) \tilde{q}_i^{r_1} (\tilde{u}_k^{r_2})^T + (T_S \tilde{\gamma}_{i,k+1}^{r_1 r_2} - \gamma_{i,k+1}^{r_1 r_2}) \tilde{q}_i^{r_1} (\tilde{u}_{k+1}^{r_2})^T, \quad (17)$$

где $\tilde{\Phi}$ – изображение-контейнер, содержащее внедренные данные; T_S – коэффициент внедрения, задаваемый с целью адаптивного уменьшения искажений изображения-контейнера,

$$T_S > 0. \quad (18)$$

Восстановление (извлечение) значения отдельного бита данных $\tilde{b}_m$, скрытно внедренного в изображение-контейнер $\tilde{\Phi}$ на основании значений измененных проекций $\tilde{\gamma}_{ik}^{r_1 r_2}$ и $\tilde{\gamma}_{i,k+1}^{r_1 r_2}$, выполняется следующим образом:

$$\tilde{b}_m = \begin{cases} 0, & |\tilde{\gamma}_{ik}^{r_1 r_2}| \geq |\tilde{\gamma}_{i,k+1}^{r_1 r_2}|, \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (19)$$

Рассмотренный выше метод скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования может быть применен для внедрения информации в цветное изображение на основании изменения его отдельной цветовой компоненты. Большинство цветных изображений, распространяемых и обрабатываемых в информационно-телекоммуникационных системах, представлены в цветовом пространстве RGB. В данной работе, наряду с результатами внедрения в цветные компоненты цветового пространства RGB, исследуются результаты скрытного внедрения данных в цветные компоненты цветовых пространств HSV и YCbCr, достаточно широко используемых при обработке изображений.

Для осуществления скрытного внедрения в цветное изображение задается цветовое пространство и компонента, в которую осуществляется внедрение данных. Формирование компонент в анализируемых цветовых пространствах выполняется следующим образом:

1. В цветном изображении, представленном в цветовом пространстве RGB (в данном цветовом пространстве обычно представляют цветные изображения в различных информационных системах), для описания цвета применяют три цветные компоненты, соответствующих интенсивности трех основных цветов: красный, зеленый и синий. Цветное изображение, размерности $N_1 \times N_2$ пикселей, в цветовом пространстве RGB, обычно, представляют в виде трехмерной матрицы $X = (x_{ijk})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, $k = 1, 2, \dots, 3$, где цветовой компоненте R, определяющей

интенсивность красного цвета, соответствует двумерная матрица $R=(x_{ij1})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$; цветовой компоненте G (зеленый цвет) соответствует двумерная матрица $G=(x_{ij2})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$; цветовой компоненте B (синий цвет) соответствует двумерная матрица $B=(x_{ij3})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$.

2. Для получения отдельных цветовых компонент H (цветовой тон), S (насыщенность) и V (значение цвета) в цветовом пространстве HSV (данное цветовое пространство, зачастую, предпочитают использовать художники, так как считается, что представление цвета в цветовом пространстве HSV ближе к восприятию цветов человеком) выполняется нелинейное преобразование изображения-контейнера из цветового пространства RGB, основанное на применении функции `rgb2hsv`, реализованной в среде инженерных вычислений Matlab [15].

3. Для получения отдельных цветовых компонент Y (яркость), Cb (синяя цветоразностная компонента) и Cr (красная цветоразностная компонента) в цветовом пространстве YCbCr на основании значений цветовых компонент R, G и B изображения-контейнера в цветовом пространстве RGB применяется преобразование, основанное на применении функции `rgb2ycbcr` среды Matlab [15].

После внедрения в заданную цветовую компоненту цветового пространства RGB, HSV или YCbCr на основании метода скрытого субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования выполняется (в случае необходимости) преобразование цветовой информации в заданном цветовом пространстве в цветовое пространство RGB:

- для преобразования изображения-контейнера из цветового пространства HSV в цветовое пространство RGB выполняется нелинейное преобразование, основанное на применении функции `hsv2rgb` среды Matlab;
- для преобразования изображения-контейнера из цветового пространства YCbCr в цветовое пространство RGB применяется преобразование, основанное на применении функции `ycbcr2rgb` среды Matlab.

В дальнейшем выполняется оценивание искажения (погрешности) цветного изображения в цветовом пространстве RGB на основании следующих значений:

- погрешность σ_1 отдельной цветовой компоненты изображения-контейнера в заданном цветовом пространстве, в которую скрытно внедрены данные,
- погрешность σ_2 цветного изображения, представленного в виде трехмерной матрицы в пространстве RGB,
- погрешность σ_3 яркостной составляющей цветного изображения, что позволяет оценить искажения изображения-контейнера с учетом особенностей зрительной системы человека, которая более чувствительна к изменениям яркости.

Оценивание погрешности отдельной цветовой компоненты изображения-контейнера в заданном цветовом пространстве в результате скрытного внедрения в нее данных предлагается выполнять на основании следующего соотношения:

$$\sigma_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (\tilde{f}_{ij} - f_{ij})^2 / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} f_{ij}^2}, \quad (20)$$

где $\Phi = (f_{ij})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$, – заданная цветовая компонента исходного цветного изображения; $\tilde{\Phi} = (\tilde{f}_{ij})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$, – цветовая компонента, содержащая внедренные данные.

Оценивание погрешности цветного изображения-контейнера (представленного в виде трехмерной матрицы в пространстве RGB) в результате скрытного внедрения данных предлагается выполнять следующим образом: после внедрения данных в отдельную цветовую компоненту заданного цветового пространства осуществляется переход (в случае необходимости) в цветовое пространство RGB, затем и вычисляется следующее значение погрешности:

$$\sigma_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^3 (\tilde{x}_{ijk} - x_{ijk})^2 / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^3 x_{ijk}^2}, \quad (21)$$

где $X = (x_{ijk})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$, $k=1,2,\dots,3$, – исходное цветное изображение-контейнер, представленное в виде трехмерной матрицы в пространстве RGB; $\tilde{X} = (\tilde{x}_{ijk})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$, $k=1,2,\dots,3$, – содержащее внедренные данные цветное изображение-контейнер, представленное в цветовом пространстве RGB.

Оценивание погрешности яркостной составляющей цветного изображения в результате скрытного внедрения данных предлагается выполнять следующим образом: после завершения скрытного внедрения данных в отдельную цветовую компоненту заданного цветового пространства осуществляется преобразование изображения-контейнера (в случае необходимости) в цветовое пространство RGB; для вычисления яркостной составляющей Y цветного изображения применяется функция `rgb2gray` среды Matlab; погрешность яркостной составляющей Y цветного изображения вычисляется на основании следующего соотношения:

$$\sigma_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (\tilde{y}_{ij} - y_{ij})^2 / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} y_{ij}^2}, \quad (22)$$

где $Y = (y_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, – яркостная составляющая исходного цветного изображения-контейнера; $\tilde{Y} = (\tilde{y}_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, – яркостная составляющая цветного изображения-контейнера, содержащего внедренные данные.

Вычислительные эксперименты. Целью проведенных в работе вычислительных экспериментов является оценивание погрешности цветного изображения-контейнера при внедрении данных на основании метода скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования в его отдельную цветовую компоненту в заданном цветовом пространстве RGB, HSV или YCbCr, используя величины (20)–(22). Вычислительные эксперименты проведены в среде инженерных вычислений Matlab на основании применения рассматриваемого метода скрытного внедрения в цветные изображения и функций среды Matlab по преобразованию цветовых пространств.

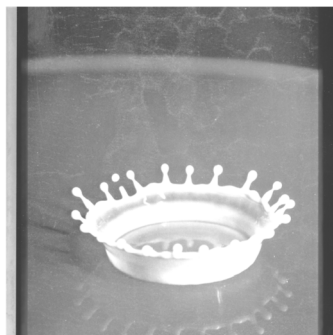
Для скрытного внедрения в качестве изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4 были использованы изображения, размерности 512×512 пикселей, размещенные в открытом доступе в информационно-телекоммуникационной системе Интернет. На рисунке 1 приведены яркостные составляющие (получены при применении функции `rgb2gray` среды Matlab) рассматриваемых цветных изображений-контейнеров.



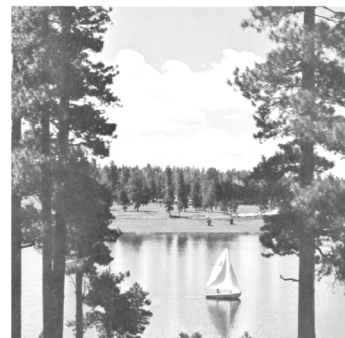
И1



И2



И3



И4

Рисунок 1 – Яркостные составляющие изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4

Внедряемые в ходе вычислительных экспериментов данные сформированы на основании фрагмента изображения, приведенного на рисунке 2. Объем скрытно внедряемых данных в цветовую компоненту, размерности 512×512 пикселей, составил 8192 бит.



Рисунок 2 – Внедряемые данные: слева – в виде фрагмента изображения, справа – в бинарной форме

Параметр T_p (10) и коэффициенты T_s (18), t_γ (16), применяемые в методе скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования для учета частотных свойств изображений-контейнеров, выбирались таким образом, чтобы получить незначительные величины погрешности цветовых компонент в результате скрытного внедрения 8192 бит данных и обеспечить восстановление (извлечение) внедренных данных без искажений.

Для скрытного внедрения использована подобласть пространственных частот $V_{16,16}$ при разбиении области определения косинус преобразования на 16×16 подобластей, так как предварительные исследования показали, что при использовании данной частотной подобласти имеется возможность внедрить заданное количество бит данных при незначительных искажениях изображений-контейнеров.

В таблице 1 приведены значения погрешностей σ_1 (20), σ_2 (21), σ_3 (22), полученные в результате скрытного внедрения на основании рассматриваемого метода 8192 бит данных в цветовые компоненты R, G и B изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4, представленных в цветовом пространстве RGB.

Таблица 1 – Погрешность изображений-контейнеров при скрытном внедрении в их цветовые компоненты R, G и B (цветовое пространство RGB)

Параметр T_p	Коэффициент T_s	Коэффициент t_γ	Цветовая компонента	Погрешность цветовой компоненты σ_1	Погрешность цветного изображения σ_2	Погрешность яркостной составляющей σ_3
Изображение-контейнер И1						
0,9999	0,1	10	R	0,0038	0,0022	0,0021
0,9999	0,05	8	G	0,0059	0,0033	0,0041
0,9999	0,05	8	B	0,006	0,0036	0,0019
Изображение-контейнер И2						
0,9999	0,05	7	R	0,0053	0,0029	0,0026
0,9999	0,03	7	G	0,0057	0,0033	0,0041
0,9999	0,05	6	B	0,0049	0,003	0,0016
Изображение-контейнер И3						
0,9999	0,04	6	R	0,0037	0,003	0,003
0,9998	0,03	4	G	0,0716	0,0292	0,034
0,9995	0,02	5	B	0,0099	0,004	0,0023
Изображение-контейнер И4						
0,998	0,005	5	R	0,011	0,006	0,0041
0,999	0,005	4	G	0,0121	0,0073	0,0078
0,999	0,005	4	B	0,0133	0,0076	0,0028

Результаты, приведенные в таблице 1, показывают, что использование при скрытном внедрении цветовых компонент цветового пространства RGB позволяет, в случае анализируемых изображений-контейнеров, получить незначительные погрешности цветного изображения. При скрытном внедрении в цветовую компоненту G изображения-контейнера И3 значения погрешностей σ_2 и σ_3 несколько повышены, что можно объяснить преобладанием красного цвета на изображении и наличием больших областей изображения с незначительным изменением оттенков красного цвета. Результаты, приведенные в таблице 1, также показывают, что скрытное внедрение в цветовую компоненту G вызвало увеличение значений погрешности яркостной составляющей анализируемых цветных изображений-контейнеров по сравнению с результатами внедрения в другие цветовые компоненты.

Следует отметить, что в большинстве проведенных вычислительных экспериментов искажения цветных изображений-контейнеров, а также их яркостных составляющих визуально не наблюдаются.

В таблице 2 приведены значения погрешностей σ_1 (20), σ_2 (21), σ_3 (22), полученные в результате скрытного внедрения на основании рассматриваемого метода 8192 бит данных в цветовые компоненты H, S и V изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4, представленных в цветовом пространстве HSV.

Таблица 2 – Погрешность изображений-контейнеров при скрытном внедрении в их цветовые компоненты H, S и V (цветовое пространство HSV)

Параметр T_p	Коэффициент T_s	Коэффициент t_γ	Цветовая компонента	Погрешность цветовой компоненты σ_1	Погрешность цветного изображения σ_2	Погрешность яркостной составляющей σ_3
Изображение-контейнер И1						
0,993	0,01	1	H	0,1037	0,0787	0,0718
0,9995	0,1	7	S	0,0138	0,0037	0,0039
0,9999	0,1	5	V	0,0042	0,0041	0,0048
Изображение-контейнер И2						
0,992	0,01	3	H	0,0875	0,0428	0,027
0,9997	0,1	3	S	0,0133	0,0035	0,0035
0,9999	0,1	3	V	0,0044	0,0043	0,0045
Изображение-контейнер И3						
0,985	0,005	2	H	0,1867	0,4808	0,2354
0,9995	0,03	4	S	0,0279	0,0199	0,02
0,9999	0,1	3	V	0,0034	0,0035	0,0037
Изображение-контейнер И4						
0,95	0,003	0,7	H	0,2445	0,1533	0,0833
0,993	0,005	2	S	0,0298	0,0091	0,0066
0,999	0,03	1	V	0,0083	0,0075	0,0078

Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что использование цветовых компонент S и V цветового пространства HSV позволяет, в случае анализируемых изображений-контейнеров, получить незначительные погрешности цветного изображения, при этом внедрение в цветовую компоненту H вызывает значительные искажения цветного изображения-контейнера.

В таблице 3 приведены значения погрешностей σ_1 (20), σ_2 (21), σ_3 (22), полученные в результате скрытного внедрения на основании рассматриваемого метода 8192 бит данных в цветовые компоненты Y, Cb и Cr изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4, представленных в цветовом пространстве YCbCr.

Таблица 3 – Погрешность изображений-контейнеров при скрытном внедрении в их цветовые компоненты Y, Cb и Cr (цветовое пространство YCbCr)

Параметр T_p	Коэффициент T_s	Коэффициент t_γ	Цветовая компонента	Погрешность цветовой компоненты σ_1	Погрешность цветного изображения σ_2	Погрешность яркостной составляющей σ_3
Изображение-контейнер И1						
0,9998	0,1	7	Y	0,0053	0,0071	0,0071
0,99985	0,5	10	Cb	0,0041	0,0059	0,0041
0,9999	0,3	10	Cr	0,0043	0,0058	0,004
Изображение-контейнер И2						
0,9999	0,05	7	Y	0,0052	0,0071	0,0069
0,9995	0,6	10	Cb	0,004	0,006	0,0039
0,9997	0,4	9	Cr	0,0039	0,0055	0,0038
Изображение-контейнер И3						
0,99978	0,03	11	Y	0,0075	0,0089	0,0098
0,999	0,06	11	Cb	0,0052	0,0073	0,0049
0,9995	0,04	11	Cr	0,0053	0,0086	0,0048
Изображение-контейнер И4						
0,9994	0,004	10	Y	0,0085	0,0105	0,0102
0,995	0,01	9	Cb	0,0065	0,0081	0,004
0,997	0,008	9	Cr	0,0067	0,0079	0,0039

Результаты, приведенные в таблице 3, показывают, что использование цветовых компонент Y, Cb и Cr цветового пространства YCbCr позволяет, в случае анализируемых изображений-контейнеров, получить незначительные погрешности цветного изображения.

Для наглядного представления значений погрешности яркостной составляющей цветных изображений при внедрении в различные цветовые компоненты изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4 в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr на рисунке 3 на основании данных, приведенных в таблицах 1–3, представлены соответствующие графики.

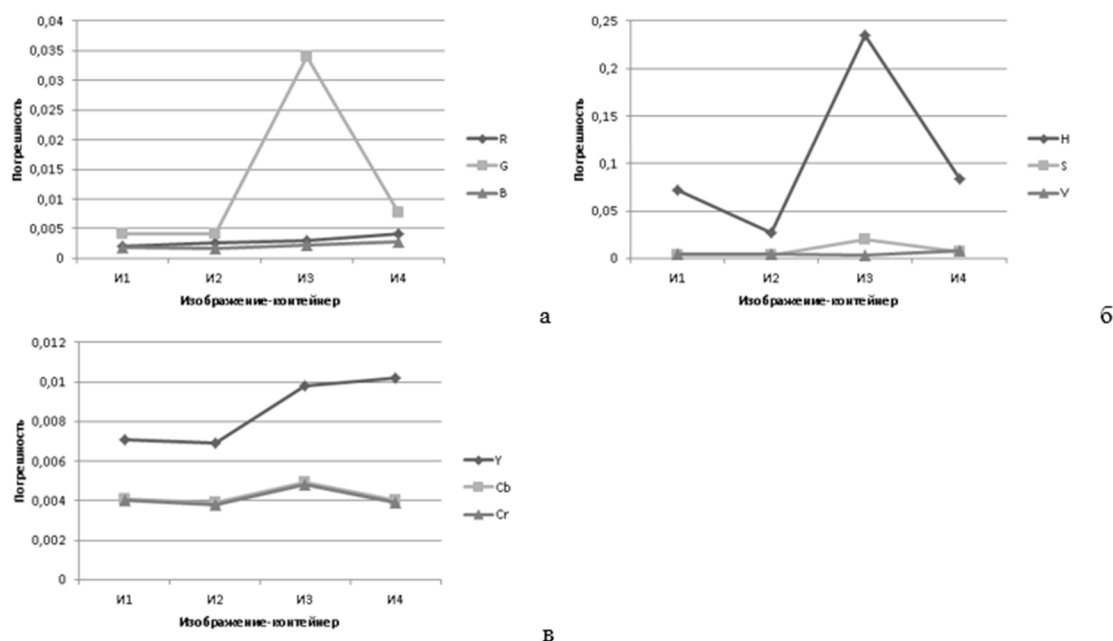


Рисунок 3 – Погрешность яркостной составляющей цветных изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4: а – при внедрении в цветовые компоненты в цветовом пространстве RGB, б – при внедрении в цветовые компоненты в цветовом пространстве HSV, в – при внедрении в цветовые компоненты в цветовом пространстве YCbCr

Графики, приведенные на рисунке 3, а также данные, приведенные в таблицах 1–3, демонстрируют, что при внедрении в изображения-контейнеры И1, И2, И3 и И4 наименьшая погрешность яркостной составляющей получена при скрытном внедрении в цветовую компоненту В (синий цвет) данных изображений в цветовом пространстве RGB. Как было отмечено выше, увеличение погрешности яркостной составляющей изображения-контейнера И3 можно объяснить особенностью цветов представленных на нем объектов. Увеличение погрешности яркостной составляющей наблюдается при внедрении в цветовые компоненты G, H и Y анализируемых изображений в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr соответственно.

В результате проведения большинства вычислительных экспериментов искажения цветных изображений-контейнеров, а также их яркостных составляющих визуально не наблюдаются.

Заключение. В работе рассмотрен метод скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования, основанный на относительном изменении (с учетом значений внедряемых данных) проекций изображения-контейнера, представленного в оттенках серого, на собственные векторы субполосных матриц косинус преобразования, а также его применение для внедрения данных в цветные изображения. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что при скрытном внедрении данных на основе рассмотренного метода в цветовые компоненты изображений, представленных в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr, могут быть достигнуты незначительные искажения (погрешности) цветных изображений-контейнеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00657.

Библиографический список

1. Аграновский, А. В. Стеганография, цифровые водяные знаки и стеганоанализ / А. В. Аграновский. – Москва : Вузовская книга, 2009. – 220 с.: ил.
2. Грибунин, В. Г. Цифровая стеганография / В. Г. Грибунин, И. Н. Оков, И. В. Туринцев. – Москва : Солон-пресс, 2016. – 262 с.
3. Конахович, Г. Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г. Ф. Конахович., А. Ю. Пузыренко. – Киев : МК-Пресс, 2006. – 288 с.
4. Жилияков, Е. Г. Исследование устойчивости стеганографии в изображениях / Е. Г. Жилияков, А. А. Черноморец, Е. В. Болгова, Н. Н. Гахова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2014. – № 1 (172). – С. 168–174.
5. Cox, I. J. Digital watermarking and steganography / I. J. Cox., M. Miller, J. Bloom., J. Fridrich, T. Kalker. – Morgan Kaufmann, 2007. – 593 p.
6. Hartung, F. Multimedia. Watermarking Techniques / F Hartung, M. Kutter // Proceedings IEEE, Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information. – 1999. – № 87 (7). – P. 1079–1107.

7. Zhilyakov, E. G. Hidden data embedding method based on the image projections onto the eigenvectors of subinterval matrices / E. G. Zhilyakov, A. A. Chernomorets, E. V. Bolgova, I. I. Oleynik, D. A. Chernomorets // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – № 7 (3.19). – P. 72–80.
8. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва : Техносфера, 2012. – 1104 с.
9. Жилияков, Е. Г. О субполосном внедрении в цветные изображения / Е. Г. Жилияков, А. А. Черноморец, Е. В. Болгова, В. А. Голощапова // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2015. – № 1 (198). – С. 158–162.
10. Жилияков, Е. Г. О субполосном внедрении информации в подобласти пространственных частот изображений-контейнера / Е. Г. Жилияков, А. А. Черноморец, Е. В. Болгова, Н. Н. Гахова // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2014. – № 9. – С. 85–87.
11. Болгова, Е. В. О методе субинтервального скрытного внедрения данных в изображения / Е. В. Болгова, А. А. Черноморец // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2018. – Т. 45, № 1. – С. 192–201.
12. Жилияков, Е. Г. О разложении изображений по собственным векторам субполосных матриц / Е. Г. Жилияков, А. А. Черноморец, Е. В. Болгова // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2014. – № 15 (186). – С. 185–189.
13. Черноморец, А. А. О квазисубполосных матрицах косинус-преобразования / А. А. Черноморец, Е. В. Болгова, Д. А. Черноморец // *Научный результат. Информационные технологии*. – 2019. – Т. 4, № 3. – С. 11–19.
14. Болгова, Е. В. О собственных числах субинтервальных матриц косинусного преобразования / Е. В. Болгова // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2017. – № 2 (251). – С. 92–101.
15. Документация MATLAB. – Режим доступа: <https://docs.exponenta.ru/R2019b/matlab/functionlist.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус (дата обращения: 26.04.2021).

References

1. Agranovskiy, A. V. *Steganografiya, tsifrovyye vodyanyye znaki i steganoanaliz* [Steganography, digital watermarks and steganoanalysis]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2009. 220 p.
2. Gribunin, V. G., Okov, I. N., Turintsev, I. V. *Tsifrovaya steganografiya* [Digital steganography]. Moscow, Solon-press, 2016. 262 p.
3. Konakhovich, G. F., Puzyrenko, A. Yu. *Kompyuternaya steganografiya. Teoriya i praktika* [Computer steganography. Theory and practice]. Kiev, MK-Press Publ., 2006. 288 p.
4. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Gakhova, N. N. Issledovaniye ustoychivosti steganografii v izobrazheniyakh [Investigation of the steganography stability in images]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information Technologies], 2014, no. 1 (172), pp. 168–174.
5. Cox, I. J., Miller, M., Bloom, J., Fridrich, J., Kalker, T. *Digital watermarking and steganography*. Morgan Kaufmann, 2007. 593 p.
6. Hartung, F., Kutter, M. Multimedia. Watermarking Techniques. *Proceedings IEEE, Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information*. 1999, no. 87 (7), pp. 1079–1107.
7. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Oleynik, I. I., Chernomorets, D. A. Hidden data embedding method based on the image projections onto the eigenvectors of subinterval matrices. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, no. 7 (3.19), pp. 72–80.
8. Gonzalez, R., Woods, R. *Digital image processing*. Moscow, Technosphere, 2012. 1104 p.
9. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Goloshchapova, V. A. O subpolosnom vnedrenii v tsvetnyye izobrazheniya [About subband embedding in colored images]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information technologies], 2015, no. 1 (198), pp. 158–162.
10. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Gakhova, N. N. O subpolosnom vnedrenii informatsii v podoblasti prostranstvennykh chastot izobrazheniya-konteynera [About information subband embedding into space frequencies subareas of image-container]. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* [Journal of Neurocomputers], 2014, no. 9, pp. 85–87.
11. Bolgova, E. V., Chernomorets, A. A. About the method of subinterval covert data injection into images [On the method of subinterval data hidden embedding in images]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information technologies], 2018, vol. 45, no. 1, pp. 192–201.
12. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V. O razlozhenii izobrazheniy po sobstvennym vektoram subpolosnykh matrits [About decomposition of images to the eigenvectors of subband matrix]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information technologies], 2014, no. 15 (186), pp. 185–189.
13. Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Chernomorets, D. A. O kvazisubpolosnykh matritsakh kosinus-preobrazovaniya [On quasi-subband matrices of cosine transform]. *Nauchnyy rezultat. Informatsionnyye tekhnologii* [Research Result. Information Technologies], 2019, vol. 4, no. 3, pp. 11–19.

14. Bolgova, E. V. O sobstvennykh chislakh subintervalnykh matrits kosinusnogo preobrazovaniya [About the eigenvalues of cosine transform subinterval matrices]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin. Series. Economics Information Technologies], 2017, no. 2 (251), pp. 92–101.

15. *Dokumentatsiya MATLAB* [MATLAB Documentation]. Available at: <https://docs.exponenta.ru/R2019b/matlab/functionlist.html> (accessed 26.04.2021).

DOI 10.21672/2074-1707.2021.55.3.025-032

УДК 004.051

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННЫХ ВИДЕОФАЙЛОВ ФОРМАТОВ AVI И MP4

Статья поступила в редакцию 22.07.2021, в окончательном варианте – 29.07.2021.

Гераськин Алексей Сергеевич, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 410012, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,

кандидат педагогических наук, доцент кафедры теоретических основ компьютерной безопасности и криптографии, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3118-1022>, e-mail: gerascinas@mail.ru

Уколов Родион Владимирович, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 410012, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,

аспирант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1856-3541>, e-mail: trustgreen1@mail.ru

В современном мире видеофайлы занимают особую роль. Развитие алгоритмов сжатия видеoinформации и рост возможностей сети Интернет позволяет передавать видеофайлы. При передаче видеофайлов неизбежно возникают повреждения. Соответственно возникает вопрос о восстановлении поврежденного файла и получении информации из него. В статье рассматриваются наиболее часто используемые видеофайлы расширений AVI, MP4. В результате исследования было выявлено, что наиболее часто встречаются повреждения в заголовках, что приводит к ошибкам при открытии файлов проигрывателями, менее часто повреждаются данные. Повреждение данных приводит к тому, что некоторый фрагмент видеофайла либо проигрывается с ошибками, искажениями, либо пропускается. В статье рассматривается возможность восстановления повреждения видеофайла с помощью изъятия неискаженных данных и предлагается алгоритм анализа кадров с помощью нейронной сети. В рамках алгоритма нейронная сеть применяется для определения поврежденных кадров в видеоданных. Алгоритм был реализован в виде программного продукта. Для первого этапа проверки эффективности алгоритма производились умышленные искажения одного кадра для каждого исследуемого видеофайла. В результате экспериментальной проверки разработанного алгоритма было выявлено, что он обеспечивающий высокую точность обнаружения искаженных последовательностей кадров.

Ключевые слова: нейронная сеть, область данных видеофайла, повреждение видеофайла, расширение AVI, расширение MP4, алгоритм восстановления

RESEARCH ON APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR RESTORING DAMAGED VIDEO FILES OF AVI AND MP4 FORMATS

The article was received by the editorial board on 22.07.2021, in the final version – 29.07.2021.

Geraskin Aleksey S., Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation,

Cand. Sci. (Pedagogics), Associate Professor of the Department of Computer Security and Cryptography Theory, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3118-1022>, e-mail: gerascinas@mail.ru

Ukolov Rodion V., Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation,

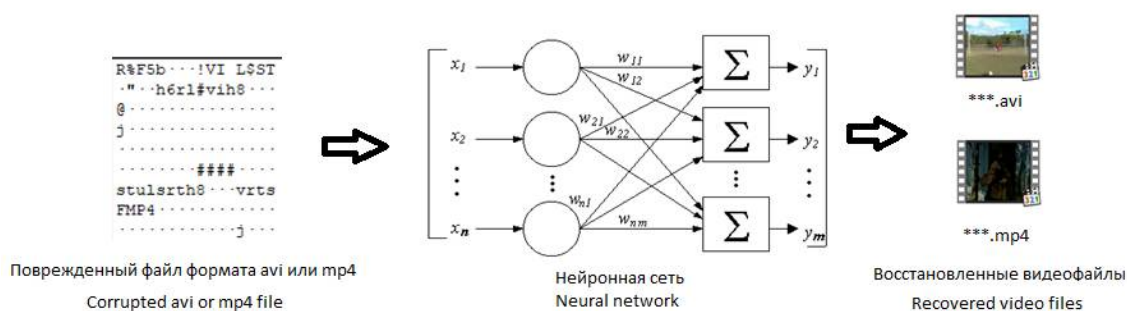
post-graduate student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1856-3541>, e-mail: trustgreen1@mail.ru

In the modern world, video files play a special role. The development of video compression algorithms and the growth of the Internet's capabilities make it possible to transfer video files. Damage inevitably occurs when transferring video files. Accordingly, the question arises about restoring a damaged file and obtaining information from it. The article discusses the most commonly used video file extensions AVI, MP4. As a result of the study, it was revealed that the most common damage is in the headers, which leads to errors when opening files by players, data is damaged less often. Data corruption leads to the fact that a certain fragment of the video file is either played with errors, distortions, or is skipped. The article discusses the possibility of recovering damaged video file using the

removal of undistorted data and proposes an algorithm for analyzing frames using a neural network. As part of the algorithm, a neural network is used to identify damaged frames in video data. The algorithm was implemented as a software product. For the first stage of checking the efficiency of the algorithm, deliberate distortions of one frame were made for each video file under study. As a result of experimental verification of the developed algorithm, it was revealed that it provides high accuracy in detecting distorted frame sequences.

Keywords: neural network, editing, data area of the video file, pasting into the video file, gluing the video file, clipping from the video file

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. С развитием технологий цифровое представление информации является наиболее распространенным. Такое представление информации позволяет ее передавать на большие расстояния с помощью сети Интернет. С развитием технологий передачи информации и роста скорости обмена в сети Интернет видеoinформация приобретает всё большую значимость. В настоящее время невозможно представить какого-либо продукта, рассчитанного на массового потребителя, без возможности записывать и/или воспроизводить видеофайлы [1]. При этом существуют проблемы, связанные с неумышленным, а также умышленным повреждением видеофайлов [2, 3].

Дефекты могут находиться как в заголовках, так и в самих данных. Повреждения в заголовках зачастую делают невозможным открытие файлов проигрывателями. Дефекты в данных реже приводят к невозможности открытия файла, чаще оказывается, что некоторый фрагмент видеофайла либо проигрывается с ошибками, искажениями, либо пропускается [4].

Повреждения заголовков могут быть исправлены с помощью анализа видеофайла целиком, переопределением параметров [5], переиндексированием блоков данных [6], однако дефекты в данных зачастую незаметны для проигрывателей, но существенны для пользователя. Таким образом, в данной работе предлагается использование нейронной сети для определения искажений и повреждений в видеоданных.

Целью исследования является обнаружение и исправление повреждений видеофайлов расширений AVI, MP4 с помощью нейронной сети.

Причины повреждения и техники восстановления. Одной из основных причин того, что видеофайл не воспроизводится проигрывателем, является полное или частичное отсутствие метаданных в контейнере. Повреждение часто возникает в следующих случаях:

- при передаче видеофайла, если процесс завершился некорректно [4];
- при некорректном изменении формата файла;
- при архивировании файла [7, 8];
- при использовании приложений для восстановления файлов [9];
- при попытке воспроизведения файла проигрывателями, не поддерживающими данный формат.

Часто при восстановлении видеофайлов может потребоваться не поврежденный видеофайл, записанный на том же устройстве с теми же настройками, благодаря которому можно получить полезную информацию: описание кадров, смещение каждого блока.

Одним из способов восстановления является отделение аудио- и видеoinформации файла и добавление нового заголовка, после чего осуществляется создание нового видеофайла. Данный метод неосуществим для многих форматов.

Вторым способом является переиндексация, при которой из поврежденного видеофайла покадрово перезаписывается информация в новый видеофайл, при этом каждый кадр регистрируется как новый фрейм. После чего перезаписываются индексы.

Сложность данного метода состоит в идентификации видеокадров. Как правило, начало кадра легко найти по определенной комбинации символов. Конец кадра можно идентифицировать, если все кадры имеют равную длину или размещены подряд, но, к примеру, в формате MP4 аудио- и видеоданные перемежаются, а отделить аудиоданные довольно сложная задача.

Конец кадра, как говорилось выше, зачастую сложно найти, в этом случае можно воспользоваться видеодекодером. Для каждого кадра декодер определяет, где он заканчивается. Основная проблема этого способа – сложность реализации, также метод имеет свои минусы:

- требуется свободно распространяемый декодер;
- кадры не могут быть декодированы поодиночке;
- нужна интеграция декодера с приложением.

Видеоданные MP4-файла часто сжаты стандартами H.264 и MPEG4. Сложность восстановления видеофайла, сжатого по стандарту MPEG4, зависит от типа аудиоданных, находящихся в контейнере. Видеокодек использует пространственное и временное сжатие с ключевыми кадрами. Каждый видеокадр начинается с последовательности “B6000001”, но для обнаружения конца кадра нет никакой ключевой последовательности. Если видеоданные чередуются с аудиоданными, которые сложно идентифицировать, задача усложняется.

Данные, сжатые по стандарту H.264, сложно восстановить из-за универсальности стандарта, его легко конфигурировать для определенных целей, при этом он практически не предоставляет шаблонов для сжатия данных. Для восстановления файла, сжатого по H.264, часто необходимо иметь неповрежденный файл, с данными, закодированными аналогично. Ещё одна сложность – один блок может быть полноценным фрагментом, то есть содержать более одного кадра.

Структура форматов AVI и MP4. Для рассмотрения возможных повреждений форматов AVI и MP4 рассмотрим их внутреннее строение. Определим основные блоки формата AVI. Метаданные для каждого потока как аудио, так и видео хранятся в блоках 'hdrl', где параметр fccType определяет тип данных потока. 'vids' – указывает, что поток содержит видеоданные. 'auds' – указывает, что поток содержит аудиоданные [10].

Данные хранятся в блоке (атоме) 'movi'. Каждый кадр информации определяется с помощью сигнатуры '###cc', где '###' – номер порядка потока, который зависит от порядка описания в блоке 'hdrl', нумерация начинается с нуля, а 'cc' – двухсимвольный код, определяющий тип данных, лежащих в данном кадре. Код 'wb' означает, что данный кадр является аудио кадром, код 'db' – несжатый DIB-видеофрагмента, код 'dc' – сжатый. После сигнатуры идет 4-й байтовое целочисленное неотрицательное число – размер кадра в байтах. Далее лежит сам кадр.

'01wb' в данном случае означает, что это второй, по описанию в метаданных, поток и он имеет аудио-тип. Четыре байта, идущих после сигнатуры '01wb' отвечают за размерность этого кадра.

Важно понимать, что порядок байт в файлах формата AVI установлен Little-endian [10].

При повреждении имени заголовков RIFF, AVI полоса прокрутки видеофайла, а также звук являются неактивной в любых известных медиа проигрывателях. При нарушении целостности имени заголовка LIST, видео не может быть воспроизведено. При повреждении имен заголовков hdrl, avih, strl видео воспроизводится корректно.

При нарушении целостности заголовков strh, strf перестает воспроизводиться поврежденный поток, при этом искажаются и остальные потоки.

Рассмотрим строение формата MP4. В данном формате все видеоданные хранятся в атоме 'mdat', без привязки к порядку следования [11].

В метаданные для каждого потока, не важно, видео или аудио, инкапсулированы атомы 'stsz' и 'stco', логическая структура которых напоминает таблицу.

В атомах 'stsz' хранятся размерности каждого кадра. Атом имеет два параметра, которые имеют четырехбайтовое целочисленное неотрицательное представление. Если все кадры в потоке одной и той же длины, первый параметр, SampleSize, указывает размерность всех кадров, иначе данный параметр установлен в 0. Следующий параметр, SampleCount, указывает количество кадров в потоке. Далее, если SampleSize = 0, следует SampleCount записей, идущих подряд, каждая последующая запись определяет размерность соответствующего кадра. Если SampleSize равен 0, то кадры имеют разную размерность.

В атомах 'stco' хранятся смещения (местонахождение) для каждого кадра. Атом имеет один параметр – SampleCount – количество кадров в потоке. Далее следуют SampleCount записей, указывающих смещение кадра относительно начала файла в байтах [12].

Важно понимать, что для каждого отдельно взятого потока значения параметров SampleCount для обоих атомов должны быть равными. Байты в формате mp4 имеют порядок Big-endian.

Зная параметры вышерассмотренных атомов, можно найти все кадры исследуемого потока. Однако стоит отметить, что данный способ хранения фрагментов данных присущ не для всех кодеков, используемых в формате mp4.

При повреждении имен заголовков ftyp, mvhd файл формата MP4 некорректно воспроизводится. При нарушении целостности заголовка контейнера moov, медиа проигрыватели выдавали ошибку воспроизведения. При повреждении заголовков trak и его податомов соответствующие потоки перестают воспроизводиться или некорректно проигрываются.

Алгоритм анализа кадров нейронной сетью. В данной работе предлагается рассмотреть алгоритм восстановления с помощью изъятия неискаженных данных из видеофайла. Для этого необходимо определить поврежденные кадры в видеоданных. Определение поврежденных кадров производится с помощью нейронной сети, архитектура которой наиболее изучена и является простой в реализации.

В представленной работе основная цель – определить возможность и эффективность использования нейронных сетей для рассматриваемой проблемы. Исходя из данных критериев были выбраны следующие параметры нейронной сети:

- однослойный перцептрон [13];
- логистическая функция с параметром $a = 1$ в качестве активационной функции;
- обучение с учителем;
- метод обратного распространения ошибки [14].

Алгоритм анализа кадров нейронной сетью представляется следующим образом:

1. Пусть количество кадров N .
2. prob_list – массив вероятностей искаженности кадра.
3. Цикл по i от 1 до $N-4$.
- 3.1. Цикл по j от i до $i+3$.
- 3.1.1. Вычисляется разница каждого пикселя в отдельности для кадров с номерами j и $j+1$.
- 3.1.2. Список разностей пикселей делится на 10 равных частей (секторов).
- 3.1.3. В каждом секторе выбирается среднее значение.
- 3.2. Получившиеся 40 секторов попадают на вход нейронной сети.
- 3.3. На выходе нейронной сети выбирается среднее значение и записывается в массив prob_list;
4. Выводится график значений массива prob_list.

Результаты исследований и их обсуждение. Был создан программный продукт [15], реализующий предложенный алгоритм анализа и восстановления, и проведены тесты на его эффективность представленной. Для первого этапа проверки эффективности алгоритма производились умышленные искажения одного кадра для каждого исследуемого видеофайла. Данные, проанализированные необученной сетью, определяют с близкой к 0,5 вероятностью поврежденности для каждого (рис. 1).

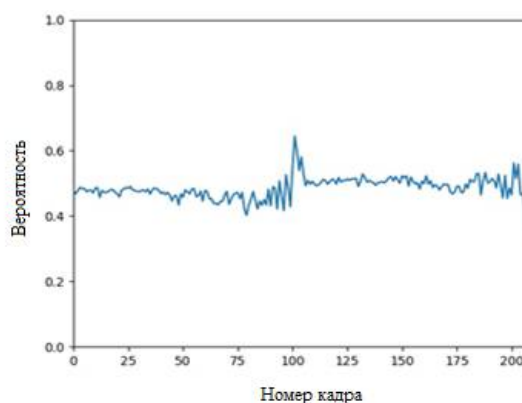


Рисунок 1 – Пример вывода графика вероятностей при необученной сети

После 40 циклов обучения нейронной сети график вероятностей понижается в среднем вдвое (рис. 2).

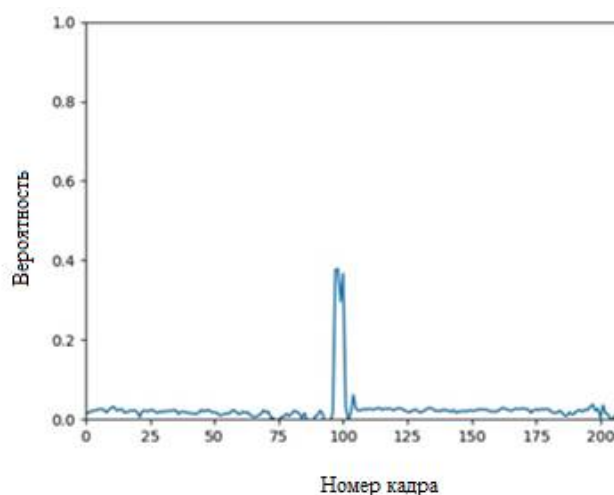


Рисунок 4 – График вероятностей при испорченном 100-м кадре

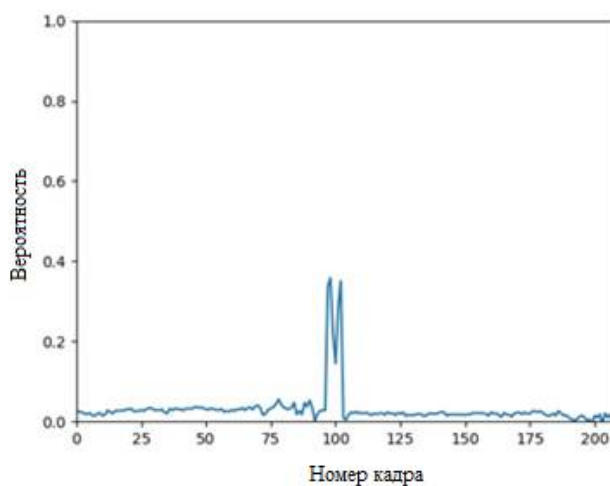


Рисунок 5 – График вероятностей при испорченных с 100 по 102 кадры

Следующий этап проверки заключался в искажении нескольких последовательно идущих кадров видеофайла. Так же, как и на предыдущем этапе проверки, замечено увеличение значений, соответствующих искаженным кадрам. Следует добавить, что при искажении кадров некоторыми случайно сгенерированными пикселями (шумами), эффективность алгоритма немного выше (в целом, на 5 %). При затирании кадров оригинального видеофайла кадрами, несущими некоторую информацию (неслучайное распределение пикселей), похожими друг на друга и идущими более трех подряд, алгоритм определяет зачастую лишь начало и конец фрагмента, в котором они находятся.

Улучшение алгоритма увеличением количества одновременно рассматриваемых подряд идущих кадров (пункт алгоритма 3.1 – увеличить $i+3$ до необходимого значения), однако это сильно скажется на скорости работы программы.

Эффективность метода была рассчитана из количества верно найденных искаженных кадров или последовательностей, деленных на количество проведенных экспериментов. Количество экспериментов с поврежденными кадрами – 90. При этом 83 раза нейронная сеть верно определяла место повреждения. Тогда точность алгоритма – 92 %. Экспериментов с неповрежденными видеоданными – 120. Из них три раза нейронная сеть определяла один кадр как искаженный. После данных случаев, коэффициент, устанавливающий минимальное значение для определения поврежденности кадра, был повышен до 0,12.

Таким образом, можно выделить сильные и слабые стороны алгоритма.

Плюсы подхода:

- большая точность обнаружения искаженных кадров или поврежденных последовательностей кадров длиной не более четырех;

- нахождение неисправных последовательностей кадров длиной более четырех, при этом возможно улучшение метода вторым проходом нейронной сети с большим количеством секторов (большим количеством рассматриваемых на каждом шаге кадров);

- дополнительно: успешный поиск 25-х кадров, встроенных в видеоданные, которые отличаются от соседних кадров;

- возможность дальнейшего улучшения алгоритма методами поиска ЦВЗ в кадрах.

Минусы подхода:

- точность метода никогда не достигнет отметки 100 % (особенности нейронного поиска);
- зависимость алгоритма от коэффициента, устанавливающего минимальное значение для определения поврежденности кадра;

- не исключены ложные срабатывания алгоритма.

Заключение. Предложен метод нахождения поврежденных кадров видеоданных с использованием нейронной сети, обеспечивающий высокую точность обнаружения искаженных последовательностей кадров длиной не более четырех, существуют возможности усиления алгоритма увеличением количества последовательно идущих рассматриваемых кадров и внедрением методов поиска ЦВЗ. Однако данный подход имеет минусы: точность никогда не достигнет отметки 100 %, зависимость от коэффициента, устанавливающего минимальное значение для определения поврежденности кадра. Также не исключены ложные срабатывания алгоритма. Нейронная сеть была обучена на изначально подготовленной выборке. В ходе экспериментов с файлами с поврежденными кадрами нейронная сеть верно определяла место повреждения в 92 % случаях (83 из 90 раз). На неповрежденных данных сеть три раза из ста двадцати определяла один кадр как искаженный. После чего коэффициент, устанавливающий минимальное значение для определения поврежденности кадра, был повышен до 0,12, в результате чего ложные срабатывания прекратились.

Библиографический список

1. Moghavvemi, S. Social media as a complementary learning tool for teaching and learning: The case of youtube / S. Moghavvemi, A. Sulaiman, N. I. Jaafar & N. Kasem // The International Journal of Management Education. – 2018. – № 1 (16). – P. 37–42.
2. Малыхина, Н. И. Алгоритм действий следователя в типовых ситуациях расследования мошенничеств, совершенных с использованием сети Интернет / Н. И. Малыхина, С. В. Кузьмина // Вестник Томского государственного университета. – 2021. – № 462. – С. 238–247.
3. Lee, W. Y. Automatic reconstruction of deleted AVI video files composed of scattered and corrupted fragments / W. Y. Lee, K. H. Kim, H. Yang, Y. W. Ko // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – № 37 (79). – P. 28355–28367.
4. Liu, Y. Using Redundancy to Repair Video Damaged by Network Data Loss / Y. Liu, M. Claypool // ACM/SPIE Multimedia Computing and Networking (MMCN). – San Jose, California, USA, January 25–27. – 2000. – Vol. 3969 – P. 73–84.
5. Ahmed, M. Key frame extraction and indexing for multimedia databases / M. Ahmed, A. Karmouch, S. Abu-Hakima // Vision Interface. – 1999. – Vol. 99. – P. 1–1.
6. Shruthi, N. Dominant frame extraction for video indexing / N. Shruthi, S. Priyamvada // 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). – IEEE. – 2017. – P. 1799–1803.
7. Зубков, А. Ю. Выбор методов идентификации кластеров при восстановлении фрагментированных файлов / А. Ю. Зубков // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского. – 2017. – С. 377–378.
8. Шагун, А. А. Восстановление информации поврежденных архивов / А. А. Шагун, А. В. Баранов, А. М. Кадан // Технологии информатизации и управления : сб. науч. ст. – Минск, 2011. – Вып. 2. – С. 95–98.
9. Hu, P. Computer Testing and Maintenance and Data Recovery Technology / P. Hu // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – № 2 (1648). – P. 022198.
10. Dianwu, X. U. Study on AVI file format and its application [J] / X. U. Dianwu // Modern Electronics Technique. – 2008. – Vol. 2. – P. 119–122.
11. Amon, P. File format for scalable video coding / P. Amon, T. Rathgen, D. Singer // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2007. – № 9 (17). – P. 1174–1185.
12. Ningsih, P. A. S. L. E. Mp4 video steganography using least significant bit (lsb) substitution and advanced encryption standard (AES) / P. A. S. L. E. Ningsih, G. M. A. Sasmita, N. M. I. M. Mandenni // Journal of Theoretical & Applied Information Technology. – 2017. – № 21 (95). – P. 5805–5814.
13. Седых, И. А. Обучение нейронных сетей на кластеризованных данных / И. А. Седых, Д. Ю. Соколовских // II Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2017. – № 4 – С. 16–21.
14. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль. – Москва : ДМК-Пресс, 2018. – 652 с.
15. Уколов, Р. В. Программа для анализа видеофайлов на предмет наличия повреждений : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, рег. № 2019615359 от 24.05.2019 / Р. В. Уколов. – Москва : Роспатент, 2019.

References

1. Moghavvemi, S., Sulaiman, A., Jaafar, N. I., & Kasem, N. Social media as a complementary learning tool for teaching and learning: The case of youtube. *The International Journal of Management Education*, 2018, no. 16 (1), pp. 37–42.
2. Malykhina, N. I., Kuzmina, S. V. Algoritm deystviy sledovatelya v tipovykh situatsiyakh rassledovaniya mo-shennichestv, sovershennykh s ispolzovaniem seti Internet [Algorithm of the investigator's actions in typical situa-tions of investigating frauds committed using the Internet]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Bulletin], 2021, no. 462, pp. 238–247.
3. Lee, W. Y., Kim, K. H., Yang, H., & Ko, Y. W. Automatic reconstruction of deleted AVI video files com-posed of scattered and corrupted fragments. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, no. 79 (37), pp. 28355–28367.
4. Liu, Y., Claypool M. Using Redundancy to Repair Video Damaged by Network Data Loss. *ACM/SPIE Mul-timedia Computing and Networking (MMCN)*. San Jose, California, USA, January 25–27, 2000, vol. 3969, pp. 73–84.
5. Ahmed, M., Karmouch, A., & Abu-Hakima, S. Key frame extraction and indexing for multimedia databases. *Vision Interface*, 1999, vol. 99, pp. 1–1.
6. Shruthi, N., & Priyamvada, S. Dominant frame extraction for video indexing. *2017 2nd IEEE International Con-ference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2017, pp. 1799–1803.
7. Zubkov, A. Yu. Vybory metodov identifikatsii klasterov pri vosstanovlenii fragmentirovannykh faylov [Selection of methods for cluster identification when restoring fragmented files]. *Mezhvuzovskaya nauchno-tehnicheskaya konfe-rentsiya studentov, aspirantov i molodykh specialistov imeni E.V. Armenskogo* [Interuniversity scientific and technical conference of students, postgraduates and young professionals named after E.V. Armensky], 2017, pp. 377–378.
8. Shagun, A. A., Baranov, A. V., Kadan, A. M. Vosstanovlenie informatsii povrezhdennykh arkhivov [Recov-ering information from damaged archives]. *Tekhnologii informatizatsii i upravleniya* [Informatization and manage-ment technologies]. Minsk, 2011, pp. 95–98.
9. Hu, P. Computer Testing and Maintenance and Data Recovery Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2020, vol. 1648, no. 2, pp. 022198.
10. Dianwu, X. U. Study on AVI file format and its application [J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, vol. 2, pp. 119–122.
11. Amon, P., Rathgen, T., & Singer, D. File format for scalable video coding. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, no. 17 (9), pp. 1174–1185.
12. Ningsih, P. A. S. L. E., Sasmita, G. M. A., Mandenni, N. M. I. M. MP4 video steganography using least significant bit (LSB) substitution and advanced encryption standard (AES). *Journal of Theoretical & Applied Infor-mation Technology*, 2017, no. 95 (21), pp. 5805–5814.
13. Sedykh, I. A., Demakhin, D. S. Obucheniye neyronnykh setey na klasterizovannykh dannyykh [Multilayer perceptron with source data clustering]. *II Vestnik Lipeckogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [II Bulletin of Lipetsk State Technical University], 2017, no. 4, pp. 16–21.
14. Goodfellow, J., Joshua, B., Courville, A. *Glubokoe obucheniye* [Deep Learning. Liters]. Moscow, DMK-Press, 2018.
15. Ukolov, R. V. Programma dlya analiza videofaylov na predmet nalichiya povrezhdeniy [Software for ana-lyzing video files for damage]. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya JeVM* [Certificate of state registration of a computer program], no. 2019615359, Moscow, Rospatent Publ., 2019.

УДК 004.42

МНОГОПОТОЧНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ API WEB-WORKERS

Статья поступила в редакцию 01.03.2021, в окончательном варианте – 21.05.2021.

Бородин Олег Валерьевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, магистрант, e-mail: oleg.borodin.1998@mail.ru

Егунов Виталий Алексеевич, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, кандидат технических наук, доцент, e-mail: vegunov@mail.ru

В работе рассматривается WebWorkers API – средство, которое позволяет посредством языка JavaScript запускать пользовательские скрипты в фоновом потоке браузера. Использование WebWorkers API приносит в клиентскую веб-разработку многопоточность, которую изначально JavaScript не поддерживает. Рассматриваются проблемы асинхронного выполнения, с которыми можно столкнуться на клиентской стороне. Основное внимание уделяется одной из разновидностей воркеров – Dedicated Workers, их совместимости и применимости использования. Приводится в качестве примера несколько ситуаций, которые демонстрируют плюсы использования технологии. Рассматривается вычислительный эксперимент, в рамках которого осуществляется параллельная обработка нескольких изображений. Анализируется решение этой задачи как в многопоточной реализации, так и без использования WebWorkers API, анализируется полученное ускорение. Приводится обзор существующих решений, где в качестве альтернативы WebWorkers API приводится вариант асинхронного исполнения веб-приложений, в частности техника выполнения AJAX-запросов. Также в качестве некоторой альтернативы приводится использование Promise, которые используются для согласования синхронных и асинхронных действий приложения. Анализируются достоинства и недостатки технологии WebWorkers API. В конце работы подводятся итоги и выделяются реальные сценарии использования технологии.

Ключевые слова: JavaScript Multithreading, Web Development, Dedicated Workers, WebWorkers API, Image Processing, Loaded Background Calculations, JavaScript Parallelize

MULTI-THREADED FRONTEND IMAGE PROCESSING USING WEB-WORKERS API

The article was received by the editorial board on 01.03.2021, in the final version – 21.05.2021.

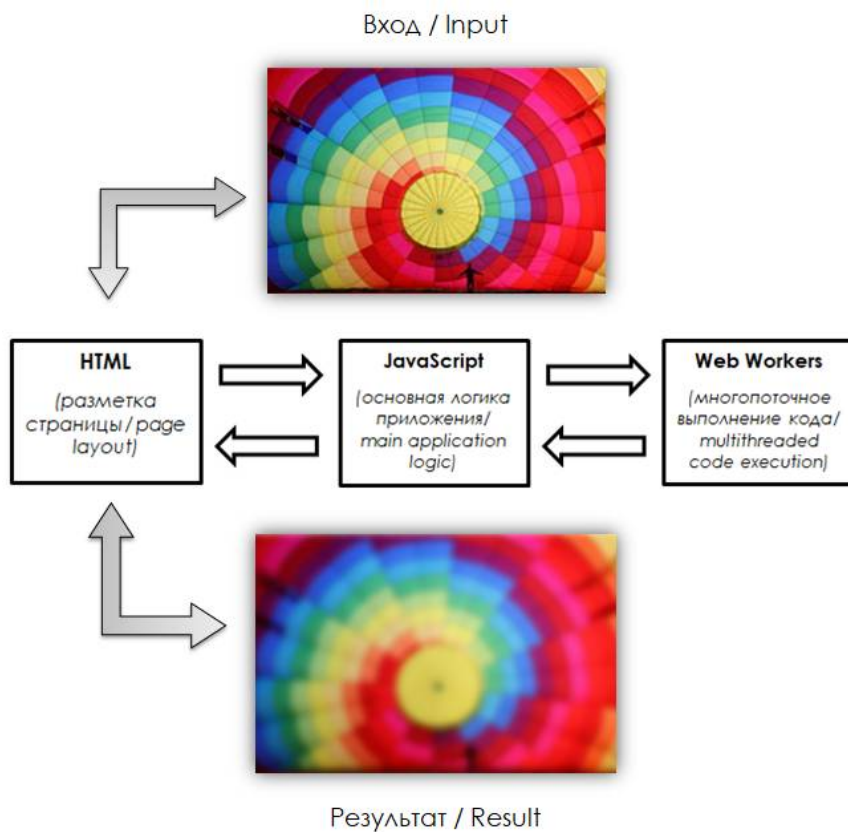
Borodin Oleg V., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, master student, e-mail: oleg.borodin.1998@mail.ru

Egunov Vitaly A. Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), e-mail: vegunov@mail.ru

The paper considers the WebWorkers API, a tool that allows you to run user scripts in the background stream of the browser using the JavaScript language. Using the WebWorkers API brings multithreading to client web development that JavaScript does not support natively. The problems of asynchronous execution that can be encountered on the client side are considered. The main attention is paid to one of the types of workers – Dedicated Workers, their compatibility and applicability of use. As an example, there are several situations that demonstrate the advantages of using the technology. A computational experiment is considered in which several images are processed in parallel. The solution to this problem is analyzed both in a multithreaded implementation and without using the WebWorkers API, and the resulting acceleration is analyzed. An overview of existing solutions is provided, where, as an alternative to the WebWorkers API.

Keywords: JavaScript Multithreading, Web Development, Dedicated Workers, Web Workers API, Image Processing, Loaded Background Calculations, JavaScript Parallelize

Графическая аннотация (Graphical annotation)



Введение. Возможность использования параллельных вычислений, безусловно, является весомым технологическим аспектом, с помощью которого систему можно не только масштабировать для многопользовательского использования, но и задействовать все доступные вычислительные ресурсы.

Клиентская среда современных веб-приложений, как правило, представлена языком JavaScript, который в свою очередь не определяет параллельную модель выполнения – JavaScript выполняется в одном потоке. Это означает, что код на клиенте будет выполняться с использованием всего одного потока, независимо от возможностей клиентской машины. При определенных обстоятельствах это может накладывать на разработчиков существенные ограничения. И, конечно, идеологически клиент-серверная архитектура (рис. 1) не подразумевает выполнения сложных операций на клиенте – данные поступают в уже подготовленном виде, всё, что требуется сделать – отобразить их, возможно с некоторой предобработкой или дополнительной логикой, отрисовав соответствующие формы, таблицы и прочие элементы пользовательского интерфейса.



Рисунок 1 – Технология Клиент-сервер

Однако современные веб-приложения уже давно решают более сложные задачи, нежели 10 лет назад, а значит, и клиентская сторона стала обширнее и сложнее. В настоящее время фронтенд [1] представляет собой нечто большее, чем средство отображения форм и кнопок. Об этом могут сказать многочисленные графики популярности языков и выраженного интереса аудитории к ним. По данным Stack Overflow Developer Survey 2019 JavaScript 7 раз подряд стал самым популярным языком [2], что, безусловно, подчеркивает множество вариантов использования языка.

Также за последнее время выросли и размеры клиентских приложений. Об этом может сказать статья The Cost of Javascript Frameworks Тима Кадлеца, в которой проводится исследование зависимости приложений от использования комплексных фреймворков и библиотек, а также различных метрик, касающихся приложений и используемых системных ресурсов. «В состав проектов включается всё больше и больше JS-кода. По мере того, как организации движутся в сторону приложений, работающих на базе фреймворков и библиотек вроде React, Vue и прочих, мы делаем основную функциональность приложений очень сильно зависимой от JavaScript» [3]. Всё это говорит о том, что нагрузка на клиентскую сторону увеличилась.

В данной работе пойдет речь о веб-воркерах – относительно новой возможности языка JavaScript, которая позволяет выполнять вычисления в фоновом потоке браузера, не оказывая нагрузку на основной поток выполнения кода. Большинство браузеров исторически были однопоточными (сейчас эта ситуация уже изменилась), и большинство реализаций JavaScript создавалось для браузеров. Однако веб-воркеры не являются частью самого языка, они представляют собой возможность браузера, к которой можно получить доступ. То есть язык в данном случае выступает лишь в качестве интерфейса взаимодействия.

Обзор существующих решений. Как уже было сказано JavaScript – это однопоточный язык, а технология WEB WORKERS API достаточно свежая и уникальная. Поэтому конкретных аналогов данной технологии выделить сложно, но можно выделить подходы, которые применяются при распределении вычислений именно в среде JavaScript. Речь идёт об асинхронном выполнении кода.

В процессе работы браузеры выполняют различные задачи. Например, осуществляют обработку изображений, выполняют операции с локальными файлами, формируют сетевые запросы и ожидают ответа на них. Выполнение всех этих операций может занимать значительное время, соответственно в стеке запросов, куда помещаются данные задачи, формируются задержки («blocking»). В случае блокировки стека запросов, браузер не выполняет другой код, в том числе не обрабатывает запросы к пользовательскому интерфейсу. Для того чтобы избежать подобных ситуаций, браузеры используют асинхронную модель поведения [4], которая позволяет пользовательскому интерфейсу нормально функционировать, реагировать на команды пользователя.

Классическим примером использования асинхронных методов программирования является техника выполнение AJAX-запросов. В силу того, что заранее неизвестно, какое время займет ожидание ответа, запросы необходимо делать асинхронно. При этом в процессе ожидания клиент может выполнять код, который не относится к запросу. Ниже приведен пример использования такого запроса (предполагается использование библиотеки jQuery).

```
jQuery.ajax({
  url: 'https://some_site.ru',
  success: function(response) {
    // Код, выполняемый после получения ответа
  }
});
```

Однако даже при таком подходе все запросы обрабатываются WEB API браузера. Мы же хотим добиться возможности асинхронного выполнения произвольного кода. Например, код внутри функции обратного вызова, который интенсивно использует ресурсы компьютера:

```
let result = heavyCalculations();
```

Если функция heavyCalculations — произвольный код, блокирующий главный поток (например, долгий цикл), то при однопоточном подходе к JS-разработке нет никакого способа разблокировать интерфейс, браузер будет занят обработкой цикла. Существующие асинхронные функции лишь в какой-то мере смягчают ограничения, связанные с однопоточностью JS, например, в части выполнения асинхронных запросов.

Еще одним средством разгрузки главного потока можно считать функцию отложенного вызова setTimeout. Одним из широко распространенных приемов программирования является

разбиение сложных вычислений на фрагменты, которые выполняются в разных вызовах `setTimeout`. Данные фрагменты можно «распределить» по циклу событий, избежав блокировки выполнения основного сценария.

Рассмотрим простую функцию, которая вычисляет среднее значение для массива чисел методом обычного перебора в цикле `for`:

```
function average(numbers) {  
  let len = numbers.length, sum = 0;  
  if (len === 0) return 0;  
  for (let i = 0; i < len; i++)  
    sum += numbers[i];  
  return sum / len;  
}
```

Этот код можно переписать так, чтобы он имитировал асинхронное выполнение, разбив его на некоторые участки:

```
function averageAsync(numbers, callback) {  
  let len = numbers.length,  
      sum = 0;  
  if (len === 0) {  
    return 0;  
  }  
  function calculateSumAsync(i) {  
    if (i < len) {  
      setTimeout(function() {  
        sum += numbers[i];  
        calculateSumAsync(i + 1);  
      }, 0);  
    } else {  
      callback(sum / len);  
    }  
  }  
  calculateSumAsync(0);  
}
```

В данном примере для планирования вычислений используется функция `setTimeout`. Это приводит к тому, что в цикле событий размещаются функции, выполняющие лишь часть общих вычислений, а между выполнением этих функций браузер может выполнять другие вычисления, в том числе и связанные с пользовательским интерфейсом.

Первые операции представленной функции `averageAsync` ничем не отличаются от последовательной `average`. Происходит инициализация начальных переменных – длины и суммы, а также проверяется наличие элементов в массиве. Далее происходит объявление вспомогательной функции `calculateSumAsync`, которая в качестве аргумента получает индекс элемента, если индекс находится в пределах длины массива, мы выполняем вычисления и последующий рекурсивный вызов внутри анонимной функции, которая за счёт использования `setTimeout` выносится в цикл событий. Второй аргумент `setTimeout` – это время, на которое откладывается выполнение блока кода, выступающего в виде первого аргумента. Именно так и происходит распределение вычислений в основном потоке.

Говоря об асинхронных вычислениях в JavaScript, также следует упомянуть об использовании `Promise` [5], представляющих собой «обёртки» для функций обратного вызова (callback). Их можно использовать для упорядочивания синхронных и асинхронных действий. Например, используя данную возможность, можно переписать фрагмент кода с очень большой вложенностью `setTimeout` к более читаемому и удобному виду.

Однако использование `Promise` является лишь вариацией использования уже рассмотренной асинхронности. Поэтому, проанализировав имеющиеся возможности, можно установить, что веб-воркеры как клиентская технология уникальны в своем роде и предоставляет совершенно новые возможности. Поэтому любые тяжёлые операции, которые по какой-то причине не могут быть выполнены на сервере, необходимо однозначно выполнять с помощью воркеров.

Основные особенности WebWorkers API. Веб-воркеры – это потоки, принадлежащие браузеру, которые можно использовать для выполнения JS-кода без блокировки цикла событий [6]. Веб-воркеры позволяют выполнять длительные в вычислительном плане задачи без блокировки потока пользовательского интерфейса. Существующий воркер может отсылать сообщения JavaScript коду-создателю через обработчик событий, указанный этим кодом (и наоборот).

Существует три типа веб-воркеров:

- выделенные воркеры (dedicated workers);
- разделяемые воркеры (shared workers);
- сервис-воркеры (service workers).

Экземпляры выделенных веб-воркеров создаются главным процессом. Обмениваться данными с ними может только он. В данной работе основное внимание будет уделяться именно этим воркерам. Базовое взаимодействие с выделенным воркером представлено в следующем примере, реализованном в двух файлах. Файл script.js является основным и имеет следующее содержимое:

```
let worker = new Worker('webworker.js');
function test() {
  console.log('run test func');
  let data = 100;
  worker.postMessage({'key': data});
}
worker.addEventListener('message', function(event) {
  console.log(event.data);
}, false);
```

Второй файл webworker.js отвечает за вычисления на стороне воркера – именно этот код будет выполняться параллельно:

```
function print(n) { console.log(n) }
self.addEventListener('message', function(e) {
  let num = e.data.key;
  self.postMessage(print(num));
}, false);
```

Здесь определяется, как именно будут обрабатываться поступающие события. На стороне script.js отправляемые данные помещаются в объект по ключу key, соответственно по этому ключу они и будут обрабатываться в коде воркера.

Таким образом, использование данной технологии подразумевает под собой использование уже встроенного в браузер API, которое способно производить определенные операции на фоне основного потока. Схема стандартного сценария обмена данными с воркером представлена на рисунке 2.

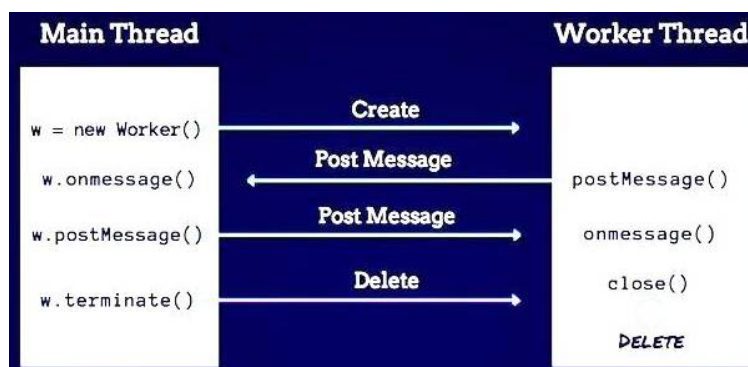


Рисунок 2 – Основной сценарий обмена данными с WebWorkers

Однако воркеры имеют свои ограничения – внутри воркер-скрипта доступен следующий набор полей [7]:

- объект navigator;
- объект location (только чтение);
- XMLHttpRequest;

- setTimeout()/clearTimeout() и setInterval()/clearInterval();
- кэш приложений;
- импорт внешних скриптов с использованием метода importScripts();
- создание других объектов Web Worker.

Но в свою очередь доступа у воркер-скрипта нет к следующим элементам:

- модель DOM (она не ориентирована на многопоточное исполнение);
- объект window;
- объект document;
- объект parent.

Пример использования нескольких воркеров для распараллеливания задачи обработки множества изображений. Воркеры позволяют продолжать исполнение логики основной страницы после запуска фоновых вычислений, таким образом приложение остается доступным для работы с другими функциями. При этом использование воркеров может позволить не только избежать полной занятости главного потока, но и значительно ускорить общий ход вычислений. Для этого необходимо использовать несколько воркеров в зависимости от размерности входных данных и сложности в их транспортировке.

Для того чтобы поработать сразу с несколькими воркерами, рассмотрим ситуацию обработки изображений с помощью JavaScript и применения алгоритма размытия, который работает по следующему принципу: рассматривается несколько пикселей вокруг каждого просматриваемого, а затем вычисляется и записывается среднее арифметическое каждой цветовой компоненты. То есть для каждого нового пикселя рассматриваются 4 пикселя в исходном изображении, чтобы смешать компоненты с нужными коэффициентами и получить сглаженный результат. Код данного алгоритма:

```
function blur(width, height, srcPixels, dstPixels) {
  let size = 5; let dstIdx = 0;
  for (let y = 0; y < height; y++) {
    for (let x = 0; x < width; x++) {
      let a = 0, r = 0, g = 0, b = 0, count = 0;
      for (let sy = y - size; sy <= y + size; sy++) {
        const yy = Math.min(height - 1, Math.max(0, sy));
        for (let sx = x - size; sx <= x + size; sx++) {
          const xx = Math.min(width - 1, Math.max(0, sx));
          let pix = srcPixels[yy * width + xx];
          r += pix & 0xff;
          g += (pix >> 8) & 0xff;
          b += (pix >> 16) & 0xff;
          a += (pix >> 24) & 0xff;
          count++;
        }
      }
      a = (a / count) & 0xff;
      r = (r / count) & 0xff;
      g = (g / count) & 0xff;
      b = (b / count) & 0xff;
      dstPixels[dstIdx++] = (a << 24) | (b << 16) | (g << 8) | r;
    }
  }
}
```

Данная функция получает на вход ширину и высоту изображения, а также ссылки на массивы пикселей в формате Uint32Array исходного изображения, которое необходимо преобразовать, и итогового изображения, в которое будет записан результат.

Стоит отметить, что в работе рассматривается подход обработки изображений с помощью нативного Canvas API, которое предоставляет средства для использования графики с помощью JavaScript и HTML-элемента <canvas> [8].

Тело самой страницы с рассматриваемым примером имеет следующий вид (там же можно встретить вышеупомянутый canvas):

```

<body>
  <h1>Without worker calculation</h1>
  <input onchange="onChange(event)" multiple="true" type="file" accept="image/png, im-
age/jpeg">
  <br>
  <div class="images">
    <img alt="Initial image...">
    <canvas></canvas>
  </div>
  <script src="/script.js"></script>
</body>

```

Пользователь с помощью элемента input может отправлять изображения на клиент, а уже дальше с ними можно производить любые действия [9]. Если мы осуществим передачу изображения из файловой системы, то результат, согласно рассматриваемому сценарию, будет получен в виде двух изображений – исходного и обработанного (рис. 3).

Конечно же, сценарий, помимо алгоритма обработки изображения, предполагает ещё и различную служебную логику: работа с Canvas API, подсчёт времени выполнения вычислений с помощью performance() [10], предобработку данных и всевозможные выводы. В рамках рассмотрения этого примера заострять внимание на этом не будет, поскольку здесь нас главным образом интересуют накладные вычисления.



Рисунок 3 – Полученный результат

Если речь идёт об обработке одного изображения, время исполнения кода приемлемо. Но, если представить себе более сложный алгоритм или увеличение размера и количества пользовательских изображений, возникают сложности, которые связаны, как минимум, с продолжением работы основной страницы. Для того чтобы детальнее это отследить, помимо подсчета времени исполнения всех вычислений на странице после старта обработки также запускается таймер, содержимое которого будет инкрементироваться каждую секунду. Выглядит это следующим образом:

```

tickCounter = 0;
t = setInterval(() => { tickCounter++ }, 1000);

```

Поскольку основной и единственный поток страницы будет занят вычислениями, инкремент счетчика таймера выполнен не будет. Чтобы убедиться в этом, а также удостовериться в эффективности использования WebWorkers, распараллелим задачу и посчитаем ускорение.

Алгоритм обработки изображения, а также вся служебная логика по обслуживанию воркера рассмотренная ранее, будут находиться в файле webworker.js, а файл script.js будет содержать в себе логику получения результата, а также обслуживания нескольких воркеров сразу:

```

let tickCounter = 0, t = null;
let startTime = 0, filesLength = 0, commonFileCounter = 0;
let workerCount = 4, workers = [];
for (let i = 0; i < workerCount; i++) {
  workers[i] = new Worker("webworker.js");
  workers[i].addEventListener("message", (e) => {

```

```

const { blurred, width, height } = e.data;
console.log(i, " - worker");
showResult(blurred, width, height);
commonFileCounter++;
if (commonFileCounter === filesLength) {
  let endTime = performance.now();
  clearInterval(t);
  console.log("Time execution in milliseconds: ", (endTime - startTime).toFixed(2));
  console.log(tickCounter);
}
}, false);
}

```

Здесь происходит инициализация счётчика, который будет инкрементироваться каждую секунду при старте обработки изображения, таймера, точки начала отсчёта вычислений, количества файлов для распределения данных между потоками, счётчика обработанных файлов, числа создаваемых воркеров, а также структуры, в которой воркеры будут расположены. Далее в цикле воркеры инициализируются на основе файла `webworker.js`. При этом обработчик изображений, в котором начинаются все вычисления после загрузки картинок со стороны пользователя, принимает следующий вид:

```

function onImageChange(e) {
  startTime = performance.now();
  tickCounter = 0
  t = setInterval(() => { tickCounter++ }, 1000);
  filesLength = e.target.files.length;
  let files = [...e.target.files], i = 0;
  while (files.length) {
    const file = files.pop();
    processImage(file, i); i++;
    if (i === workerCount)
      i = 0;
  }
}

```

Здесь фиксируется время начала обработки всех изображений, осуществляется рассылка данных основным потоком. Рассылка производится последовательно по каждому воркеру, пока все файлы не будут отданы на обработку. Сам процесс отправки и подготовки находится в функции `processImage`, которая получает файл и индекс воркера, который потом используется внутри функции для отправки данных воркеру:

```

workers[workerIdx].postMessage({ name: filename, srcPixels: srcPixels, dstPixels: dstPixels, width: width, height: height });

```

Со своей стороны каждый воркер получает данные, выполняет их обработку, а затем отправляет обратно:

```

self.addEventListener("message", function (e) {
  console.log("Worker recieved file with name: ", e.data.name);
  const { width, height, srcPixels, dstPixels } = e.data;
  const blurred = blur(width, height, srcPixels, dstPixels); // Uint32Array
  self.postMessage({ blurred: blurred, width: width, height: height });
}, false);

```

Анализ результатов распараллеливания задачи обработки множества изображений. Запуск решения производился в Google Chrome Version 86.0.4240.198 (Official Build) (64-bit) на основе 4-ядерного процессора Intel® Core™ i5-7400 Processor, то есть в рамках задачи более 4-х потоков не рассматривалось.

В первую очередь были получены результаты выполнения кода для версии без использования WebWorkers API. Производилась обработка 10, 50, 100, 250 и 500 картинок. Затем эти же порции данных были отданы на выполнение уже в многопоточных вариантах. Помимо фиксирования времени

исполнения производился также подсчёт значения счетчика tickCounter, что позволяет сделать дополнительные выводы в пользу использования технологии. Ниже приведены таблицы и построенные по ним графики. Ниже представлены таблицы (табл. 1–5) и графики (рис. 4–5) на их основе.

Таблица 1 – Количество потоков (воркеров): 0, только основной поток

Количество картинок	Значение tickCounter	Время выполнения, мс (с)	Ускорение
10	2	4770,45 (4,8)	1
50	5	24471,69 (24)	1
100	6	56396,71 (56)	1
250	7	147514,02 (147)	1
500	10	275918,03 (276)	1

Таблица 2 – Количество потоков (воркеров): основной поток и 1 воркер

Количество картинок	Значение tickCounter	Время выполнения, мс (с)	Ускорение
10	4	4594,81 (4,6)	1,04
50	23	23506,81 (23)	1,04
100	51	53458,70 (53)	1,05
250	134	142626,70 (143)	1,03
500	240	254093,43 (254)	1,09

Таблица 3 – Количество потоков (воркеров): основной поток и 2

Количество картинок	Значение tickCounter	Время выполнения, мс (с)	Ускорение
10	2	2649,73 (2,7)	1,80
50	12	12763,82 (13)	1,92
100	26	28445,50 (28)	1,98
250	67	75792,44 (76)	1,95
500	122	139010,21 (139)	1,98

Таблица 4 – Количество потоков (воркеров): основной поток и 3

Количество картинок	Значение tickCounter	Время выполнения, мс (с)	Ускорение
10	2	2287,55 (2,3)	2,09
50	10	10400,57 (10)	2,35
100	20	22356,36 (22)	2,52
250	47	56703,73 (56)	2,60
500	83	102369,96 (102)	2,70

Таблица 5 – Количество потоков (воркеров): основной поток и 4

Количество картинок	Значение tickCounter	Время выполнения, мс (с)	Ускорение
10	2	2281,85 (2,3)	2,09
50	8	8219,14 (8,2)	2,98
100	15	17922,09 (18)	3,15
250	36	50886,75 (51)	2,90
500	65	90069,58 (90)	3,06

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что целесообразность использования нескольких воркеров возрастает с ростом объема входных данных. Уже на этапе с 50 картинками варианты с количеством воркеров больше одного позволяют получить прирост в скорости выполнения обработки изображений.

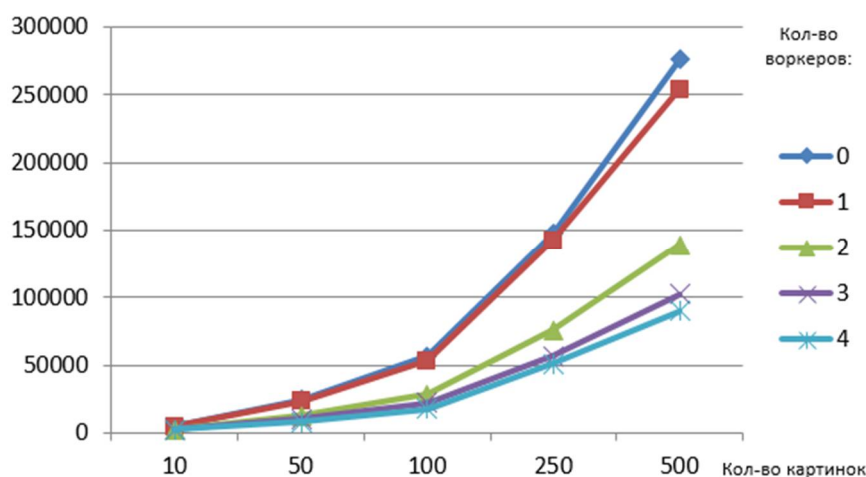


Рисунок 4 – Время выполнения вычислений (мс)

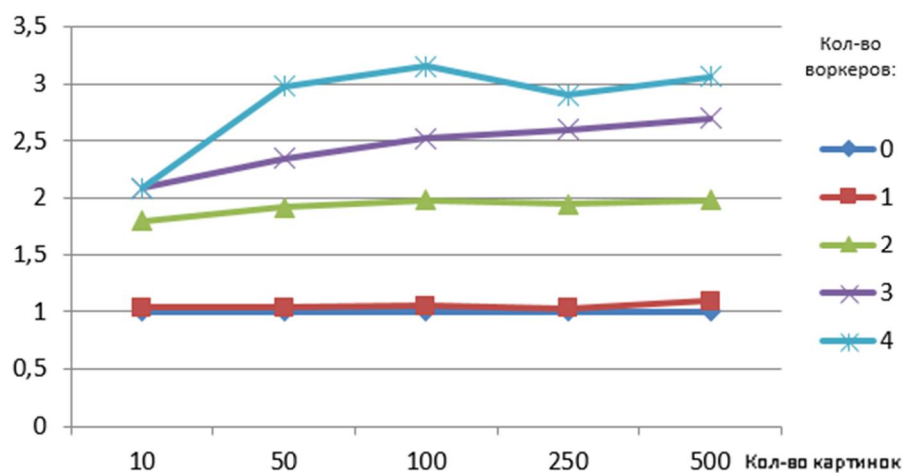


Рисунок 5 – Полученное ускорение

В случае вариантов, где вычисления выполняет либо только основной поток, либо основной поток и 1 воркер результаты практически идентичны – это связано с тем, что в обоих случаях сами вычисления производились только в одном потоке. Вариант с основным потоком и воркером при этом всё же получает небольшое ускорение, так как основной поток мог взять на себя всю работу с интерактивностью страницы, в том числе и ее отрисовку, в то время как алгоритмические расчеты выполнял воркер. Стандартное выполнение одним основным потоком оказывалось менее эффективным, поскольку вся работа в таком случае ложилась только на него. В итоге, пока происходили основные расчеты, пользователь терял доступ к приложению. Таким образом, только базирясь на результатах данного эксперимента, можно сделать вывод о том, что комбинация из одного воркера и основного потока уже приносит заметную оптимизацию даже в случае нагруженных сценариев с большим количеством входных данных. Ведь блокировки пользовательского интерфейса в ходе вычислений не будет за счет вынесения их в отдельный поток. Это и было подробно рассмотрено на базовых примерах, которые наглядно показывают, что даже если решение не удастся разбить на несколько порций данных и разослать их независимо нескольким воркерам, существенная выгода всё равно есть. Она заключается в том, что основной поток не блокируется и пользователь может продолжать взаимодействовать с приложением, его интерактивность не теряется.

Также на примере кода с многопоточной обработкой картинок мы видим, что с помощью небольшого количества строк кода мы получаем понятное и масштабируемое решение. Инициализацией воркеров мы занимаемся самостоятельно, то есть их количество можно либо задать напрямую, либо вычислить на основе каких-то параметров, либо динамически менять в зависимости от специфики задачи. Более того, помимо масштабирования мы также получаем кроссплатформенность и кроссбраузерность технологии, в чем позволяют убедиться данные с ресурсов такого рода, как caniuse.com. Ознакомиться с данными о поддержке различных веб-браузеров можно на рисунке 6.

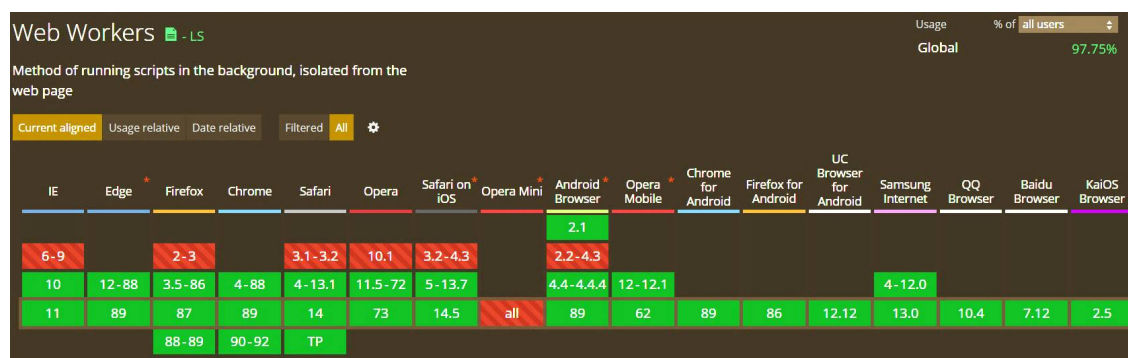


Рисунок 6 – Поддержка WebWorkers API различными браузерами

Данные цифры говорят о том, что технология не доступна для старых версий браузеров, поддержка которых официально уже прекращена. Таким образом, можно гарантировать безотказную работу решений на базе WebWorkers API на любой современной версии любого браузера.

Вышеупомянутое значение счетчика `tickCounter` тоже позволяет сделать определенные выводы. Инкремент этого значения производится основным скриптом каждую секунду, при этом известно общее время выполнения обработки того или иного количества картинок. В идеальном случае значение таймера должно быть равно времени исполнения в секундах – это будет означать, что ни одна из операций инкремента не была потеряна. Поскольку время выполнения сценариев из таблиц 1 и 2 практически идентичны – 276 секунд и 254 секунды (ускорение 1,09), сравним значения счетчиков именно для этих случаев. Для 276 секунд счетчик `tickCounter` вывел значение 10, для 254 секунд значение было равно 240. В случае работы без воркера грубый процент потерь полезных операций, которые мы могли бы совершить, составил примерно 96,4 %, для варианта с воркером – 5,5 %.

Если же мы будем анализировать другие варианты, где воркеров больше одного, результаты будут немного хуже, поскольку основному потоку приходилось также администрировать ресурсы и заниматься распределением данных, но так или иначе это окупается получаемым ускорением. Поэтому в случае с некоей реальной задачей, исходя из ее масштабов и аппаратных возможностей компьютера, необходимо самостоятельно решить, какие именно вычисления будут вынесены в отдельный поток, сколько потоков будет выделяться.

Выделяя большое количество потоков, мы не можем гарантировать, что задача обязательно ускорится, ведь как уже неоднократно было замечено, основной поток занимается администрированием ресурсов и транспортировкой данных. Также в конечном итоге ему будет необходимо разбирать очередь сообщений полученных в обратном направлении от воркеров. Взаимодействие основного потока с воркерами в общем виде схематично представлено на рисунке 7.

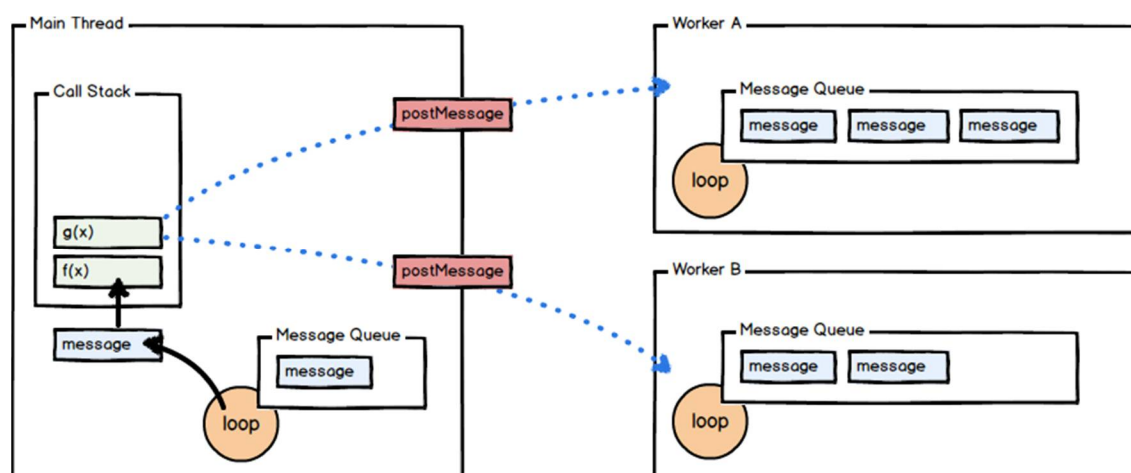


Рисунок 7 – Взаимодействие основного потока с выделяемыми воркерами

Теперь на основе полученных и проанализированных результатов следует выделить ряд ограничений, с которыми можно столкнуться в ходе распараллеливания данной задачи, а также рассмотрим достоинства применения технологии (табл. 6).

Таблица 6 – Достоинства и недостатки применения технологии

Достоинства	Недостатки
Поток пользовательского интерфейса свободен и может выполнять отрисовку и служебные задачи вовремя. Это, безусловно, повышает отзывчивость приложения и не вынуждает пользователя покидать страницу с мыслью о том, что процесс полностью «завис»	Накладные расходы на пересылку и сериализацию данных, невозможность передачи данных воркеру по ссылке, так как речь идёт о разных контекстах выполнения
Скорость выполнения вычислений увеличивается, но только для тех случаев, которые можно выполнять параллельно	Соответственно из первого пункта следует, что некоторые алгоритмы могут потребовать некоторого видоизменения для учёта всех тонкостей
Несмотря на некоторые ограничения, технология имеет хорошую поддержку и удобный интерфейс взаимодействия, кроссбраузерность и кроссплатформенность, не нуждается в настройке и установке	Также из первого пункта следует, что некоторые данные могут потребовать конвертацию из-за потери контекста и отсутствия доступа к некоторым нужным API

Выделим основные сценарии использования воркеров. На данный момент на основе полученных результатов, а также возможностей и ограничений технологии можно выделить несколько вариантов использования:

- работа с файлами;
- шифрование;
- предварительная загрузка данных;
- проверка правописания;
- рендеринг трёхмерных сцен.

Рассмотрим каждый немного подробнее.

Работа с файлами. На основе рассмотренного примера по работе с картинками можно сделать вывод, что при работе с другими типами файлов воркеры также могут быть актуальны. При всем бурном развитии web в целом и стандартов html в частности, работа с файлами практически никогда не менялась. Следует отметить, что с приходом HTML5 и связанных с ним API появилось гораздо больше возможностей для работы с файлами, чем когда-либо в предыдущих версиях браузеров.

Для WebWorker, например, доступен FileReaderSync – синхронный вариант FileReader. Его методы считывания read* не генерируют события, а возвращают результат, как это делают обычные функции. Используется это внутри веб-воркера, поскольку задержки в синхронных вызовах, которые возможны при чтении из файла, в веб-воркерах менее важны, они не влияют на работу страницы.

Можно предположить, что если в приложении планируется активная конвертация файлов на клиенте, например, в условиях медленного соединения или высокой серверной загрузки, веб-воркеры помогут взять всю сложную обработку на себя. Также в случае отправки большого файла на сервер по частям воркеры смогут помочь в обработке нескольких участков данных, не влияя на основную работу страницы.

Шифрование. Сквозное шифрование в сети становится актуальным из-за возрастающих требований к защите пользовательских приватных данных. Операции шифрования и дешифрования могут быть очень ресурсозатратными, особенно если сценарии использования приложения требуют частого обращения к большим объёмам данных. При этом для реализации данных операций достаточно базовых возможностей JS, доступ к объектам DOM в данном случае не требуется. Соответственно, процесс выполнения шифрования воркером не оказывает влияния на работу пользовательского интерфейса сайта.

Предварительная загрузка данных. Для уменьшения времени отклика приложения можно осуществлять предварительную загрузку и сохранение данных с использованием веб-воркеров. Эти данные можно использовать позднее, когда они понадобятся для вычислений. Если предварительную загрузку данных осуществлять средствами главного потока, это явно окажет негативное влияние на интерфейс приложения. В случае использования веб-воркеров подобного эффекта наблюдаться не будет.

Проверка правописания. Простые системы проверки правописания основаны на алгоритмах работы с файлом словаря, который содержит список правильно написанных слов. Данный файл загружается, на базе словаря формируется дерево поиска. Каждое слово, переданное для проверки, ищется в полученном дереве поиска. Если слово найти не удаётся, пользователю могут быть предоставлены альтернативные варианты его написания, которые получаются путём замены символов исходного слова. Полученные альтернативные варианты ищутся в дереве, система пытается оценить их корректность. Данные действия можно выполнять в веб-воркере. Это даст пользователю возможность работать с текстом без блокировки интерфейса при проверке слова и поиске альтернативных вариантов его написания.

Рендеринг трёхмерных сцен. Здесь речь, в частности, идёт о реализации метода трассировки лучей. Данный метод представляет собой технику рендеринга, основанной на отслеживании направления лучей света. Подобные алгоритмы используют интенсивные математические вычисления. Используя подобную технику, можно реализовать различные эффекты, например, отражение и преломление, можно добиться имитации внешнего вида различных материалов, и так далее. Описанные вычисления также могут быть вынесены в веб-воркер, чтобы избежать блокировки пользовательского интерфейса. Можно даже разделить процесс рендеринга изображения между несколькими воркерами (и, соответственно, между несколькими процессорными ядрами).

Развитие технологий. Как известно, open-source среда всегда будет предлагать какое-то решение для востребованной задачи. Так и в случае воркеров появилось несколько библиотек, которые базируются на данной технологии. В качестве примера можно привести библиотеки `Parallel.js` и `Multithread.js`. Обе эти библиотеки не представляют из себя нечто альтернативное, они содержат в себе готовые реализованные операции воркеров, доступные через свои интерфейсы, которые инкапсулируют работу по пересылке данных.

`Parallel.js` – простая библиотека для многоядерной обработки в JavaScript. Она была разработана, чтобы в полной мере использовать все преимущества постоянно развивающегося API воркеров. JavaScript, без сомнения, быстр, но ему не хватает возможностей параллельных вычислений, как у языков-аналогов из-за своей модели однопоточных вычислений. `Parallel.js` решает эту проблему, предоставляя высокоуровневый доступ к многоядерной обработке с использованием веб-воркеров. Ниже представлен небольшой пример с использованием `Parallel.js` в рекурсивном расчете чисел Фибоначчи.

```
let p = new Parallel([0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]),
    log = function () { console.log(arguments) };
function fib(n) {return n < 2 ? 1 : fib(n - 1) + fib(n - 2) };
p.map(fib).then(log)
```

Другая упомянутая библиотека `Multithread.js` также представляет собой простую оболочку, которая избавляет от необходимости выполнения операций, напрямую связанных с веб-воркерами и передаваемыми объектами. Библиотека гарантирует, что любой код со сложными вычислениями с ее помощью можно запустить асинхронно в отдельном потоке, не прерывая взаимодействия с пользователем. Пример работы с библиотекой представлен ниже

```
let num_threads = 2;
let MT = new Multithread(num_threads);
```

Здесь происходит инициализация библиотеки с явным указанием числа потоков, а затем запуск самих вычислений в формате: `MT.process(function, callback)(arg1, arg2, ..., argN);`

```
MT.process(
  function Recurse(m, n) {
    if(n>0) {
      return Recurse(m + 1, n--);
    } else {
      return m;
    }
  },
  function(r) {
    console.log(r);
  }
)(5, 2);
```

`Multithread.js` использует сериализацию JSON с помощью `process()`, что позволяет работать с многопоточными асинхронными функциями так же, как с обычными функциями JavaScript. Предоставляется также оптимизированная поддержка для типизированных данных, в частности `Int32` и `Float64` (32-битные целые числа со знаком и 64-битные числа с плавающей запятой соответственно).

Используя эти библиотеки, стоит помнить об ограничениях многопоточности в JavaScript. Все переменные, передаваемые функциям, должны быть JSON-сериализуемыми, то есть только массивы, объекты и базовые типы (`Number`, `String`, `Boolean`, `null`). Объекты и массивы, передаваемые в любую

поточную функцию, будут глубоко скопированы (переданы по значению, а не по ссылке). Кроме того, многопоточные функции не имеют доступа к DOM.

Заключение. В данной работе были рассмотрены веб-воркеры - сравнительно новая возможность, доступная веб-разработчикам в большинстве современных браузеров. Веб-воркеры позволяют выносить в отдельные потоки выполнение ресурсоёмких операций, что позволяет не нагружать главный поток, который может продолжать полноценно взаимодействовать с пользовательским интерфейсом. Были описаны конкретные случаи использования, подробно рассмотрена задача распараллеливания обработки множества изображений с помощью алгоритма размытия. На основе полученных результатов было посчитано ускорение для многопоточных случаев, построены графики. Также были упомянуты другие варианты использования технологии.

Библиографический список

1. What Is a Front-End Developer? – Frontend Masters // *Front-End Developer Handbook 2018*. – Режим доступа: <https://frontendmasters.com/books/front-end-handbook/2018/what-is-a-FD.html/> (дата обращения: 10.11.2020).
2. Stack Overflow Developer Survey 2019 – Stack Overflow Insights // Stack Overflow. – Режим доступа: <https://insights.stackoverflow.com/survey/2019> (дата обращения: 10.11.2020).
3. The Cost of Javascript Frameworks – Web Performance Consulting // TimKadlec. – Режим доступа: <https://timkadlec.com/remembers/2020-04-21-the-cost-of-javascript-frameworks/> (дата обращения: 10.11.2020).
4. JavaScript Asynchronous // W3Schools. – Режим доступа: https://www.w3schools.com/js/js_asynchronous.asp (дата обращения: 12.11.2020).
5. Promise // JavaScript.info. – Режим доступа: <https://javascript.info/promise-basics> (дата обращения: 12.11.2020).
6. Background processing using web workers // Angular. – Режим доступа: <https://angular.io/guide/web-worker> (дата обращения: 08.11.2020).
7. Using Web Workers – Web APIs // MDN. – Режим доступа: developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Web_Workers_API/Using_web_workers (дата обращения: 08.11.2020).
8. Canvas tutorial – Web APIs // MDN. – Режим доступа: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Canvas_API/Tutorial (дата обращения: 11.11.2020).
9. HTML5 – Developer guides // MDN. – Режим доступа: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Guide/HTML/HTML5> (дата обращения: 11.11.2020).
10. JavaScript performance – Learn web development // MDN. – Режим доступа: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Performance> (дата обращения: 12.11.2020).

References

1. What Is a Front-End Developer? – Frontend Masters. *Front-End Developer Handbook 2018*. Available at: <https://frontendmasters.com/books/front-end-handbook/2018/what-is-a-FD.html/> (accessed 10.11.2020).
2. Stack Overflow Developer Survey 2019 – Stack Overflow Insights. *Stack Overflow*. Available at: <https://insights.stackoverflow.com/survey/2019> (accessed 10.11.2020).
3. The Cost of Javascript Frameworks – Web Performance Consulting. *TimKadlec*. Available at: <https://timkadlec.com/remembers/2020-04-21-the-cost-of-javascript-frameworks/> (accessed 10.11.2020).
4. JavaScript Asynchronous. *W3Schools*. Available at: https://www.w3schools.com/js/js_asynchronous.asp (accessed 12.11.2020).
5. Promise. *JavaScript.info*. Available at: <https://javascript.info/promise-basics> (accessed 12.11.2020).
6. Background processing using web workers. *Angular*. Available at: <https://angular.io/guide/web-worker> (accessed 08.11.2020).
7. Using Web Workers – Web APIs. *MDN*. Available at: developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Web_Workers_API/Using_web_workers (accessed 08.11.2020).
8. Canvas tutorial – Web APIs. *MDN*. Available at: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Canvas_API/Tutorial (accessed 11.11.2020).
9. HTML5 – Developer guides. *MDN*. Available at: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Guide/HTML/HTML5> (accessed 11.11.2020).
10. JavaScript performance – Learn web development. *MDN*. Available at: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Performance> (accessed 12.11.2020).

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СРОКА ПРОСРОЧКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ
КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЗАЕМЩИКОВ МИКРОФИНАНСОВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

Статья поступила в редакцию 05.05.2021, в окончательном варианте – 20.06.2021.

Досмухамедов Булат Рамильевич, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, доцент кафедры информационной безопасности и цифровых технологий, e-mail: bulat@doslab.ru

Кузнецова Валентина Юрьевна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, ассистент кафедры информационной безопасности и цифровых технологий, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: arhelial@bk.ru

В статье рассмотрена проблема недостаточной информативности предлагаемой Центробанком классификации заемщиков микрофинансовых организаций в зависимости от продолжительности их задолженности. Показано, что данное решение не позволяет в должной мере учесть слабую формализуемость процесса оценки кредитоспособности компаний, оказывающих услуги микрокредитования на российском рынке в онлайн- и оффлайн-режимах. Авторами проведен статистический анализ, который показал, что целесообразным с точки зрения прибыльности, а также рентабельности кредитного портфеля провести кластеризацию заемщиков по их уровню финансовой ответственности. Для этого авторами предложена методика оценки срока просрочки потенциальных заемщиков на основе экспертной информации.

Ключевые слова: микрофинансирование, микрофинансовые организации, скоринг, классификация заемщиков

**METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE DELAY TIME FOR SOLVING THE PROBLEM
OF CLUSTERIZATION OF BORROWERS OF MICROFINANCE ORGANIZATIONS**

The article was received by the editorial board on 05.05.2021, in the final version – 20.06.2021.

Dosmukhamedov Bulat R., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Associate Professor of the Department of Information Security and Digital Technologies, e-mail: bulat@doslab.ru

Kuznetsova Valentina Yu., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Assistant of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: arhelial@bk.ru

The article discusses the problem of insufficient information content of the classification of borrowers of microfinance organizations, proposed by the Central Bank, depending on the duration of their debt. It is shown that this solution does not allow to adequately take into account the weak formalizability of the process of assessing the creditworthiness of companies providing microcredit services in the Russian market in online and offline modes. The authors carried out a statistical analysis, which showed that it is expedient from the point of view of profitability, as well as the profitability of the loan portfolio, to cluster borrowers according to their level of financial responsibility. For this, the authors proposed a methodology for estimating the delay period of potential borrowers based on expert information.

Keywords: microfinance, microfinance organizations, scoring, classification of borrowers

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. В настоящий момент времени, когда микрофинансовая отрасль в Российской Федерации претерпевает существенные изменения в контексте цифровой экономики, четко обозначается задача усовершенствования действующих методов и стратегий управления рисками компаний, занимающихся оказанием микрофинансовых услуг. Основным недостатком действующих моделей скоринга в МФО является категорирование всех заемщиков на две категории – положительный (возвращающий займ вовремя) и отрицательный (имеющий просрочку) заемщик. В свою очередь Центробанк разработал «Указание о порядке формирования микрофинансовыми организациями резервов на возможные потери по займам», в которой были выделены 9 жестких категорий в зависимости от сроков просрочки. Но ни один из методов категоризации не учитывает тот факт, что заемщики, которые имеют просрочку до начала действия судебных издержек, являются более прибыльными, чем те, кто возвращают заемные средства вовремя, так как помимо процента за пользование займом на общую сумму долга начисляется и процент за просрочку. В связи с этим возникает задача разработки такой классификации заемщиков микрофинансовых организаций, которая бы учитывала данную закономерность и могла бы быть внедрена в новую или уже существующую скоринговую систему любой российской МФО.

Анализ сроков просрочки заемщиков базовой МФО. Для решения данной задачи была выбрана базовая микрофинансовая организация, которая является типовой для российского рынка микрофинансирования. Так были взяты обезличенные данные микрофинансовой организации, ведущей свою деятельность в смешанном формате – существуют офисы физического присутствия на территории Ростовской и Краснодарской областей, а также осуществляется выдача займов в онлайн-режиме на территории всей России.

В первую очередь были проанализированы данные о том, как меняется прибыль от кредитного обслуживания заемщика в зависимости от срока его просрочки. Графически зависимость величины прибыли от количества дней просрочки отражена на рисунке 1. Первой черной линией на данном рисунке показан момент, когда начинается начисление штрафа за просрочку (1 день просрочки), вторая линия (88–90 день просрочки) – момент, когда появляются расходы, связанные с возвратом кредита (судебные издержки и пр.). Третья линия соответствует дате, когда право требования по займу начинается подготавливаться к продаже коллекторам (начиная от 103 дня просрочки, в зависимости от решения специалиста по истребованию проблемных задолженностей).

В случае легального пользования займом (до окончания срока кредитования) клиент МФО возвращает помимо суммы основного долга сумму процентов за пользование займом (в настоящий момент законодательно максимальная величина процента за пользование составляет 1 % в сутки). Если клиент допускает просрочку по возврату, то дополнительно он оплачивает 1 % от суммы долга. При этом с 1 января 2020 года максимальный размер задолженности по микрокредитам не может быть в 1,5 раза больше суммы долга. То есть, если клиент занял 10000 рублей, то максимальная сумма, которую он должен быть вернуть, составляет 25000 рублей, с учетом всех штрафных санкций. Однако с увеличением количества дней просрочки вероятность возврата займа снижается, а начиная с 80–85 дня просрочки дело о долге подготавливается к передаче в суд, в результате чего у МФО возникают дополнительные расходы по сопровождению судебного производства, в результате чего прибыль от кредитования заемщика уменьшается.

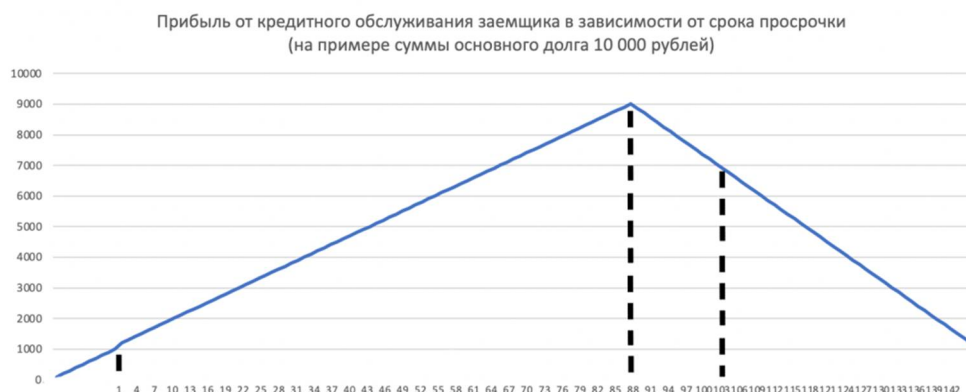


Рисунок 1 – Графическая зависимость прибыли от кредитного обслуживания заемщика от срока его просрочки

В связи с этим становится целесообразным кластеризовать заемщиков на категории, которые будут отражать прибыльность от их кредитования. С этой целью были проанализированы статистические данные заемщиков базовой микрофинансовой организации: за основу была взята обезличенная база клиентов за 2016–2017 год, содержащая около 20 000 записей. Статистическому анализу были подвергнуты данные о наличии и продолжительности кредитной просрочки (в днях) (рис. 2).

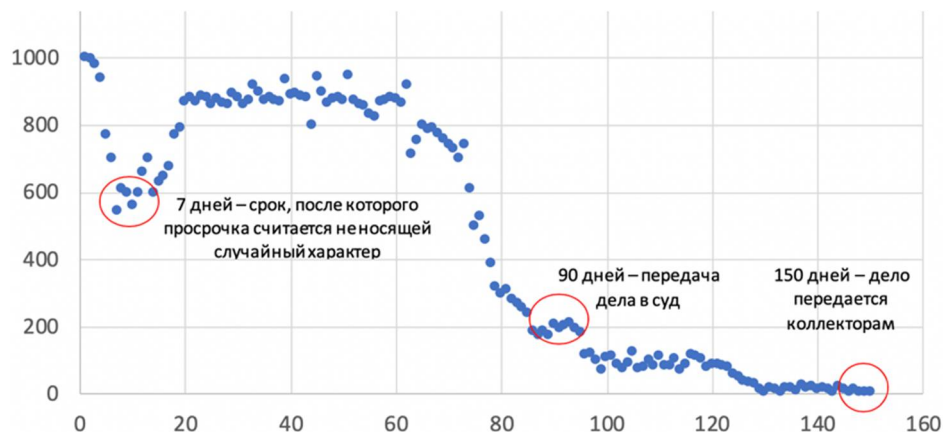


Рисунок 2 – Диаграмма, отражающая количество дней просрочки

Построение соответствующей диаграммы позволило выявить характерные «переломные» точки на графике возвратов проблемных задолженностей: 7-й, 90-й день, 150-й день. В результате изучения имеющихся материалов проблемных долгов базовой организации было установлено, что в интервале 80–90 день просрочки по займу («переломная» точка № 2) клиенты получают уведомление о том, что их дело передается в суд, что мотивирует их к возврату денежных средств до перехода процесса взыскания в судебное поле. 150-й день просрочки («переломная» точка № 3) – это крайний срок продажи проблемной задолженности коллекторским агентствам за сумму, в среднем равную 20 % от стоимости основного долга. Чаще всего такие продажи происходят раньше, когда стоимость расходов по возврату проблемной задолженности станет равна 20 % от стоимости основного долга.

В свою очередь, «переломная точка № 1» говорит о том, что вплоть до 6 дней просрочка может носить случайный непреднамеренный характер и не свидетельствует о том, что заемщик относится к категории систематических должников.

На основании этих данных можно сделать вывод, что всех заемщиков микрофинансовых организаций можно кластеризовать на 4 категории, которые характеризуют уровень финансовой ответственности заемщиков:

- категория 1 – без просрочки, деньги возвращены не позже указанного в договоре о микрокредитовании срока. Доход: % пользования. Высокий уровень финансовой ответственности;
- категория 2 – просрочка имеется. Доход: % пользования + % за просрочку. Средний уровень финансовой ответственности;
- категория 3 – просрочка имеется. Доход: % пользования + % за просрочку за вычетом расходов. Низкий уровень финансовой ответственности;
- категория 4 – просрочка имеется. Доход: отрицательный (70 % основного долга и всех

начисленных процентов в результате продажи права требования коллекторам). Дефолтный уровень финансовой ответственности.

Однако строго разграничивать данные категории для МФО нерационально, так как это будет говорить о том, что заемщик с просрочкой в 7 дней является настолько же неблагонадежным, как и заемщик с систематической задолженностью в 40 дней, а это не соответствует действительности.

В связи с этим возникает задача разработки классификатора, который учитывал бы степень принадлежности заемщика к выделенным категориям. Это позволяет сделать принципы нечеткой классификации.

Использование нечеткого классификатора и экспертной информации для решения задачи кластеризации. Концептуальная взаимосвязь между кластерным анализом и теорией нечетких множеств основана на том обстоятельстве, что при решении задач структуризации систем большинство формируемых классов объектов размыты по своей природе. Эта размытость состоит в том, что переход от принадлежности к непринадлежности элементов к данным классам скорее постепенен, чем скачкообразен.

На основании полученных из базовой организации данных был сформулирован критерий «финансовая ответственность», характеризующий поведение заемщиков при возврате кредита. Для определения критерия:

1. Введена лингвистическая переменная $K = \text{«Уровень финансовой ответственности»}$.
2. Определено терм-множество значений лингвистической переменной K : {«высокий», «средний», «низкий», «дефолтный»}. Такое количество значений было определено на основе «переломных» дат просрочек, что позволило кластеризовать заемщиков на 4 категории (K^1, K^2, K^3, K^4).

Для того чтобы определить границы выделенных категорий (K^1, K^2, K^3 и K^4), было принято решение использовать метод экспертного оценивания Дельфи. Основными отличительными чертами этого способа являются анонимность, заочность и многоуровневость. Метод Дельфи предполагает обобщение всех индивидуальных экспертных оценок относительно одной ситуации с тем, чтобы получить максимально надежное и достоверное общее мнение.

Методика оценки сроков просрочки заключается в следующем:

Шаг № 1. Собрать экспертную группу.

В качестве экспертов были выбраны генеральный директор и руководитель отдела андеррайтинга базовой организации, генеральный директор организации-аутсорсера, которая занимается автоматизацией скоринга в базовой организации и три ведущих специалиста отдела андеррайтинга базовой организации со стажем работы в данной области от 4 лет.

Шаг № 2. Разработать и предложить эксперту таблицу оценки степени принадлежности заемщиков к выделенным категориям относительно сроков их просрочки.

Каждому из экспертов была предложена таблица, отражающая дни просрочки заемщика и категорию, к которой он относится. Фрагмент такой таблицы приведен на рисунке 3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
		0	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55	58	61	64	67	70	73	76	79
K1																													
K2																													
K3																													
K4																													

Рисунок 3 – Фрагмент экспертной таблицы

Эксперту было необходимо указать степень принадлежности заемщика с указанной в столбцах просрочкой к категориям по уровню финансовой ответственности. Например, эксперт № 4 пришел к выводу, что заемщик, вернувший займ с просрочкой в 4 дня, на 0,72 принадлежит к категории K^1 (высокая финансовая ответственность) и на 0,28 к категории K^2 (средняя финансовая ответственность), а заемщик, вернувший займ с просрочкой 82 дня, на 0,15 относится к категории K^2 и на 0,85 к K^3 .

На рисунке 4 приведен фрагмент ответов эксперта № 4.

	0	1	4	7	10	13	16	19		58	61	64	67	70	73	76	79	82	85	88	91
K1	1	0,95	0,7	0,5	0,3	0,1	0	0	K1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K2	0	0,05	0,3	0,5	0,7	0,9	1	1	K2	1	0,9	0,8	0,75	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3	0,2	0,1	0
K3	0	0	0	0	0	0	0	0	K3	0	0,1	0,2	0,25	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9	1
K4	0	0	0	0	0	0	0	0	K4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 4 – Пример заполнения таблицы экспертом

Шаг № 3. Обработать полученную экспертную информацию с точки зрения согласованности мнений и при необходимости провести переоценку результатов.

Для проверки степени согласованности мнений экспертов предложено использовать коэффициент вариации. Коэффициент вариации оценок k -го дня V_k характеризует вариабельность, рассчитываемую в виде отношения среднего квадратического отклонения к среднему арифметическому значению оценки k -го дня просрочки.

Для обработки материалов, полученных в результате экспертной оценки, используют следующие обозначения:

m – число экспертов, принявших участие в оценке; $i = 1, 2, \dots, m$;

n – число сравниваемых объектов, предложенных для оценки; $k = 1, 2, \dots, n$;

m_k – число экспертов, оценивших k -й сравниваемый объект;

C_{ik} – оценка относительной важности (в баллах или долях) i -м экспертом k -го сравниваемого объекта.

Показатели обобщённого мнения могут быть получены путем вычисления среднего арифметического значения M_k величины оценки сравниваемого объекта:

$$M_k = \frac{1}{m_k} \sum_{i=1}^{m_k} C_{ik}.$$

Величина M_k определяется для каждого из дней просрочки. Чем больше значение M_k , тем больше, по мнению экспертов, важность k -го сравниваемого объекта.

Таким образом, коэффициент вариации определяется следующим образом:

а) вычисляется дисперсия D_k оценок экспертов:

$$D_k = \frac{1}{m_k - 1} \sum_{i=1}^{m_k} (C_{ik} - M_k)^2;$$

б) определяется среднее квадратическое отклонение оценок по каждому дню просрочки:

$$\sigma_k = \sqrt{D_k};$$

в) определяется коэффициент вариации оценок V_k , полученных k -м днем просрочки:

$$V_k = \frac{\sigma_k}{M_k}.$$

Коэффициент вариации V_k определяется для каждого k -го дня и характеризует степень согласованности мнений экспертов об относительной важности оценки k -го дня просрочки. Чем меньше значение V_k , тем выше степень согласованности мнений экспертов. Приемлемым является значение коэффициента вариации не более 0,25.

Так, например, для 7 дня просрочки эксперты давали следующие оценки степени принадлежности к категориям финансовой ответственности:

Таблица 1 – Результаты экспертной оценки для 7-го дня просрочки

Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Э6
0,7	0,72	0,74	0,66	0,7	0,71
0,3	0,28	0,26	0,34	0,3	0,29
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Необходимости осуществлять расчет по мнениям экспертов касательно категорий К3 и К4 нет, так как оценки нулевые. Расчет согласованности мнений экспертов целесообразно проводить по одной из категорий, по которой оценки имеются, так как оценки одной из категорий являются инверсией оценки по второй категории. Сумма степеней принадлежности по физическому смыслу задачи равна 1.

Так, рассчитаем степень согласованности экспертных оценок по принадлежности заемщика с просрочкой в 7 дней к категории К1.

Рассчитаем среднее значение оценок экспертов:

$$M_k = \frac{1}{m_k} \sum_{i=1}^{m_k} C_{ik} = \frac{1}{6} (0,7 + 0,72 + 0,74 + 0,66 + 0,7 + 0,71) = 0,705.$$

Вычислим дисперсию ряда оценок:

$$D_k = \frac{1}{m_k - 1} \sum_{i=1}^{m_k} (C_{ik} - M_k)^2 = \frac{1}{5} ((0,7 - 0,705)^2 + (0,72 - 0,705)^2 + (0,74 - 0,705)^2 + (0,66 - 0,705)^2 + (0,7 - 0,705)^2 + (0,71 - 0,705)^2) = 0,00071.$$

В свою очередь $\sigma_k = \sqrt{D_k} = \sqrt{0,00071} = 0,026645825$.

Таким образом, $V_k = \frac{\sigma_k}{M_k} = \frac{0,026645825}{0,705} = 0,0377955$, что свидетельствует о высоком уровне согласованности экспертов.

Оценки экспертов, касающиеся просрочки от 90 дней и выше, по степени согласованности были близки к пороговому значению 0,25, поэтому было принято решение согласно методу Дельфи обезличенно ознакомить экспертов с мнением коллег, в результате чего степень согласованности мнений удалось увеличить. Такое разногласие было связано с тем, что у разных экспертов разный взгляд на то, когда и на каком этапе долг следует передавать на профессиональное взыскание и стоит ли его передавать вообще. Это связано с нормативными нововведениями и рекомендациями Центробанка по минимизации количества дел, передаваемых коллекторам на взыскание.

Шаг № 4. Вычислить средние значения оценок по каждому из дней просрочки и поставить им в соответствие нечеткое число.

Экспертная информация была обработана, найдены средние значения оценок по каждому из дня просрочки, в результате чего было отмечено, что принадлежность к категории финансовой ответственности может быть охарактеризована нечетким числом (L-R)-типа.

Нечеткие числа (L-R)-типа – это разновидность нечетких чисел специального вида, т.е. задаваемых по определенным правилам с целью снижения объема вычислений при операциях над ними [3, 10].

Функции принадлежности нечетких чисел (L-R)-типа задаются с помощью невозрастающих функций на множестве неотрицательных действительных чисел действительного переменного $L(x)$ и $R(x)$, удовлетворяющих свойствам:

$$а) L(-x) = L(x), R(-x) = R(x);$$

$$б) L(0) = R(0);$$

$$в) L(\infty) = R(\infty) = 0.$$

Пусть $L(y)$ и $R(y)$ – функции (L-R)-типа. Унимодальное нечеткое число A с модой a (т.е. $\mu_A(a) = 1$ с помощью $L(y)$ и $R(y)$) задается следующим образом:

$$\mu_A(a) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right) & \text{при } x \leq a, \\ L\left(\frac{x-a}{\beta}\right) & \text{при } x \geq a, \end{cases}$$

где a – мода; $\alpha > 0, \beta > 0$ – левый и правый коэффициенты нечеткости. Таким образом, при заданных $L(y)$ и $R(y)$ нечеткое число задается тройкой $A = (a, \alpha, \beta)$. А толерантное нечеткое число задается четырьмя параметрами: $A = (a_1, a_2, \alpha, \beta)$, где a_1, a_2 – границы толерантности, т. е. в промежутке $[a_1, a_2]$ значение функции принадлежности равно 1. Тогда:

$$\mu_A(a) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right) & \text{при } x < a_1 \\ 1, & \text{при } a_1 \leq x \leq a_2 \\ L\left(\frac{x-a}{\beta}\right) & \text{при } x > a_2, \end{cases}$$

Таким образом, в соответствие введенному терм-множеству переменной K поставлены трапецевидные числа, определенные на основании полученной и обработанной экспертной информации:

$$\begin{aligned} \text{Высокий уровень (K1)} & \rightarrow \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{15-x}{15}, & 0 \leq x \leq 15 \end{cases} \\ \text{Средний уровень (K}^2\text{)} & \rightarrow \begin{cases} \frac{x}{15}, & 0 \leq x < 15 \\ 1, & 15 \leq x \leq 60 \\ \frac{90-x}{30}, & 60 < x \leq 90 \end{cases} \\ \text{Низкий уровень (K}^3\text{)} & \rightarrow \begin{cases} \frac{x+60}{30}, & 60 \leq x < 90 \\ 1, & 90 \leq x \leq 135 \\ \frac{150-x}{15}, & 135 < x \leq 150 \end{cases} \\ \text{Дефолтный уровень (K}^4\text{)} & \rightarrow \begin{cases} 1, & x \geq 150 \\ \frac{x-135}{15}, & 135 \leq x \leq 15 \end{cases} \end{aligned}$$

Графический вид полученного нечеткого классификатора приведен на рисунке 5.

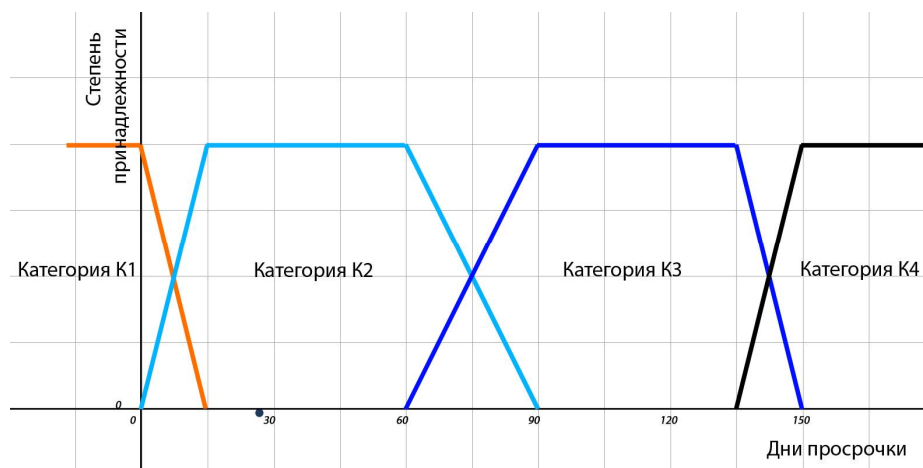


Рисунок 5 – Полученный графический классификатор

Данный классификатор позволяет в зависимости от дня просрочки установить, к какой категории финансовой ответственности можно отнести заемщика и сделать обоснованный вывод о том, сколько денежных средств может заработать МФО на его кредитном обслуживании.

Заключение. Таким образом, методика оценки сроков просрочки заемщиков с помощью экспертной информации позволила сформулировать нечеткий классификатор, который лег в основу методики управления рентабельностью кредитного портфеля микрофинансовых организаций. При этом важно отметить, что в приведенном виде методика оценки сроков просрочки может быть использована для любого количества выделенных категорий, в том числе не только заемщиков, но и любых других групп пользователей финансовых услуг.

Библиографический список

1. Горюкова, О. В. Оценка кредитоспособности заемщика - физического лица в рамках реализации МФО процедуры андеррайтинга / О. В. Горюкова // Микрофинансовые организации: Учет. Надзор. Регулирование. – 2017. – № 5 (май), № 6 (июнь).
2. Кабушкин, С. Н. Управление банковским кредитным риском : учебное пособие / С. Н. Кабушкин. – 5-е изд., стер. – Минск : Новое знание, 2015. – 338 с.
3. Круглов, В. В. Нечеткая логика и лингвистические переменные / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов // Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – Москва, 2001. – С. 18–23.
4. Кузнецова, В. Ю. Методика принятия решений по выдаче займов в микрофинансовых организациях и ее программная реализация / В. Ю. Кузнецова, И. М. Ажмухамедов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 3 (51). – С. 32–39.
5. Кузнецова, В. Ю. Нечеткий подход при кластеризации заемщиков микрофинансовых организаций / В. Ю. Кузнецова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 2 (29). – С. 24–25.
6. Кузнецова, В. Ю. Классификация заемщиков микрофинансовых организаций на основе построения расширенного цифрового профиля и прецедентного подхода / В. Ю. Кузнецова, И. М. Ажмухамедов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 3 (33). – С. 98–103.
7. Кучерявая, А. А. Микрофинансовые организации в России: текущее состояние и перспективы развития / А. А. Кучерявая, С. С. Матвеевский // Финансовая экономика. – 2021. – № 2. – С. 67–69.
8. Кучерова, С. В. Моделирование оценки платежеспособности клиентов микрофинансовой организации / С. В. Кучерова, Г. В. Аверкова // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2017. – № 4 (31). – С. 22–27.
9. Николаев, Н. А. Методы идентификации качества клиентов в системах автоматизированного кредитования с помощью визуального скоринга / Н. А. Николаев // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. – 2017. – № 3 (33). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-identifikatsii-kachestva-klientov-v-sistemah-avtomatizirovannogo-kreditovaniya-s-pomoschyu-vizualnogo-skoringa>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.08.2021).

References

1. Goryukova, O. V. Otsenka kreditosposobnosti zaemshchika – fizicheskogo litsa v ramkakh realizatsii MFO protsedury anderarraytinga [Assessment of the creditworthiness of a borrower – an individual within the framework of the MFO underwriting procedure]. *Mikrofinansovye organizatsii: Uchet. Nadzor. Regulirovanie* [Microfinance organizations: Accounting. Supervision. Regulation], 2017, no. 5 (May), no. 6 (June).
2. Kabushkin, S. N. *Upravlenie bankovskim kreditnym riskom : uchebnoe posobie* [Banking credit risk management : textbook]. 5-th ed., erased. Minsk, Novoe znanie Publ., 2015. 338 p.

3. Kruglov, V. V., Dli, M. I., Golunov, R. Yu. Nechetkaya logika i lingvisticheskie peremennye [Fuzzy logic and linguistic variables]. *Nechetkaya logika i iskusstvennye neyronnye seti* [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow, 2001, pp. 18–23.
4. Kuznetsova, V. Yu., Azhmukhamedov, I. M. Metodika prinyatiya resheniy po vydache zaymov v mikrofinansovykh organizatsiyakh i ee programmaya realizatsiya [Methodology for making decisions on issuing loans in microfinance organizations and its program implementation]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2020, no. 3 (51), pp. 32–39.
5. Kuznetsova, V. Yu. Nechetkiy podkhod pri klasterizatsii zaemshchikov mikrofinansovykh organizatsiy [Fuzzy approach to clustering borrowers of microfinance organizations]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization, and information technologies], 2020, vol. 8, no. 2 (29), pp. 24–25.
6. Kuznetsova, V. Yu., Azhmukhamedov, I. M. Klassifikatsiya zaemshchikov mikrofinansovykh organizatsiy na osnove postroeniya rasshirennogo tsifrovogo profilya i pretsedentnogo podkhoda [Classification of borrowers of microfinance organizations based on the construction of an extended digital profile and a precedent approach]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* [Caspian Engineering Bulletin], 2020, no. 3 (33), pp. 98–103.
7. Kucheryavaya, A. A., Matveevsky, S. S. Mikrofinansovye organizatsii v Rossii: tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya [Microfinance organizations in Russia: current state and development prospects]. *Finansovaya ekonomika* [Financial Economics], 2021, no. 2, pp. 67–69.
8. Kucherovala, S. V., Averkova, G. V. Modelirovanie otsenki platezhеспособности klientov mikrofinansovoy organizatsii [Modeling the assessment of the solvency of clients of a microfinance organization]. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie* [Vector of Science of Togliatti State University. Series: Economics and Management], 2017, no. 4 (31), pp. 22–27.
9. Nikolaev, N. A. Metody identifikatsii kachestva klientov v sistemakh avtomatizirovannogo kreditovaniya s pomoshchyu vizualnogo skoringa [Methods for identifying customer quality in automated lending systems using visual scoring]. *Teoriya i praktika servisa: ekonomika, sotsialnaya sfera, tekhnologii* [Service theory and practice: economics, social sphere, technologies], 2017, no. 3 (33). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-identifikatsii-kachestva-klientov-v-sistemah-avtomatizirovannogo-kreditovaniya-s-pomoschyu-vizualnogo-skoringa> (accessed 04.08.2021).

УДК 004.021

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНА

Статья поступила в редакцию 20.05.2021, в окончательном варианте – 08.07.2021.

Попов Павел Владимирович, Волжский филиал Волгоградского государственного университета, 404133, Российская Федерация, Волгоградская обл., г. Волжский, ул. 40 лет Победы, 11, кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3248-2599>, e-mail: donpascha@yandex.ru

Кравец Алла Григорьевна, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1675-8652>, e-mail: agk@gde.ru

Существенное влияние на социально-экономическое развитие региона, его инвестиционную привлекательность, интегрированность в единое экономическое и транспортное пространство страны и мира оказывает уровень развития логистической инфраструктуры. Кроме этого, важность региональной инфраструктуры как одного из индикаторов инновационного пути развития страны, также подчеркнута и в основополагающих концепциях и стратегиях Российской Федерации. Значительная часть имеющихся методик оценки уровня развития логистической инфраструктуры основана на экспертном опросе, что предполагает некоторую субъективность, либо на учете только деятельности транспорта. В настоящей работе автором предлагается алгоритм расчета интегрального показателя, позволяющего оценить эффективность функционирования региональной логистической инфраструктуры с учетом ее основной и обеспечивающей составляющей. Алгоритм включает в себя следующие этапы. Первоначально определяются ключевые показатели, характеризующие деятельность основной и обеспечивающей составляющей макро-логистической инфраструктуры региона в рамках системы управления инфраструктурой субъекта страны. После этого проводится их оценка на выявление избыточных переменных и группировка в индексы. На втором этапе проводится оценка внутренней согласованности индексов с помощью коэффициента α -Кронбаха. На последнем этапе рассчитывается интегральный показатель, характеризующий развитие макро-логистической инфраструктуры региона. Кроме этого, предложенный алгоритм позволяет выявить дисбаланс в развитии отдельных видов транспорта, регионально-подсортировочных складов, а также финансовой и информационной деятельности.

Ключевые слова: система управления, алгоритм, региональная логистическая инфраструктура, контроллинг, интегральный показатель

ALGORITHM FOR ASSESSING THE LEVEL OF EFFICIENCY OF THE LOGISTIC INFRASTRUCTURE OF THE REGION

The article was received by the editorial board on 20.05.2021, in the final version – 08.07.2021.

Popov Pavel V., Volgograd State University (Branch in Volzhsky), 11 40 let Pobedy St., Volzhsky, 404133, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3248-2599>, e-mail: donpascha@yandex.ru

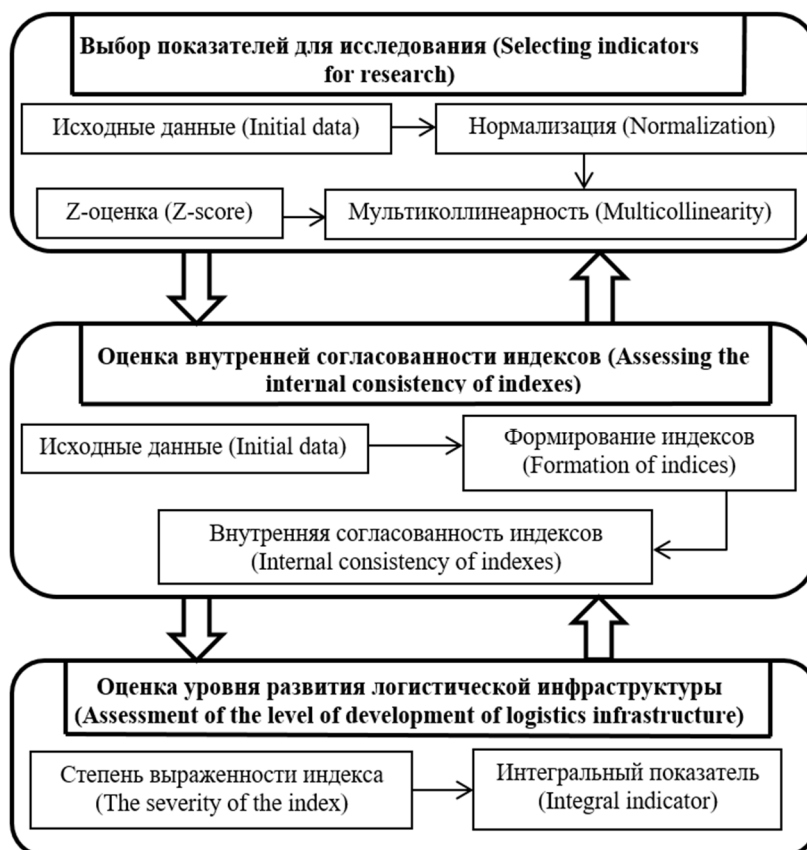
Kravets Alla G., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1675-8652>, e-mail: agk@gde.ru

The level of development of the logistics infrastructure has a significant impact on the socio-economic development of the region, its investment attractiveness, integration into a single economic and transport space of the country and the world. In addition, the importance of regional infrastructure as one of the indicators of the country's innovative path of development is also emphasized in the fundamental concepts and strategies of the Russian Federation. A significant part of the available methods for assessing the level of development of the logistics infrastructure is based on an expert survey, which implies some subjectivity, or taking into account only the activities of transport. In this work, the author proposes an algorithm for calculating the integral indicator, which makes it possible to assess the efficiency of the functioning of the regional logistics infrastructure, taking into account its main and supporting component. The algorithm includes the following stages. Initially, key indicators are determined that characterize the activities of the main and supporting component of the macro-logistics infrastructure of the region within the framework of the infrastructure management system of the constituent entity of the country. After that, they are assessed to identify redundant variables and group them into indices. At the second stage, the internal consistency of the indices is assessed using the α -Cronbach coefficient. At the last stage, an integral indicator is calculated that characterizes the development of the macro-logistics infrastructure of the region. In addition, the proposed algorithm makes it possible to identify an imbalance in the development of certain types of transport, regional sub-sorting warehouses, as well as financial and information activities.

Keywords: management system, algorithm, regional logistics infrastructure, controlling, integral indicator

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Одним из инструментов влияния на эффективность функционирования региональной экономики является система управления макро-логистической инфраструктурой субъекта страны. Она позволяет не только снизить издержки, связанные с продвижением материального потока, поддерживать заданный уровень обслуживания потребителей, но и повышает транзитный потенциал, инвестиционную привлекательность, межрегиональную интеграцию, встраивание региона в глобальную цепочку поставок. Это подтверждается значительным количеством работ отечественных и зарубежных ученых, в которых показана взаимосвязь между социально-экономическими показателями регионов и логистической инфраструктурой субъектов стран.

Например, влияние транспортной составляющей логистической инфраструктуры на экономику региона рассмотрено в работах Ю. Н. Гольской [21], Д. И. Кокурина [11], Leonard K Cheng [13] и других авторов. В данных работах показано, что взаимосвязь между валовым региональным продуктом и показателями транспортно-логистической инфраструктуры может быть представлена в виде линейной модели множественной регрессии. Необходимо отметить, что в статьях Д. И. Кокурина и Leonard K Cheng была проведена проверка на мультиколлинеарность, гетероскедастичность, статистическую значимость коэффициентов. Это позволяет сделать вывод о содержательности построенной модели множественной регрессии.

Взаимосвязь между уровнем развития логистической инфраструктуры и социально-экономическими показателями региона была установлена в работах Ж. С. Раимбекова [14], Pinar Nayaloglu [12] и других авторов. На основании проведенных исследований авторы указывают о возможности построения линейной модели множественной регрессии. Например, В. В. Лукинским и Е. В. Павловой показана взаимосвязь между валовым региональным продуктом и логистической инфраструктурой Санкт-Петербурга. В качестве ключевых параметров логистической инфраструктуры авторами были приняты показатели как основной, так и обеспечивающей составляющей. На основании построенной линейной модели множественной регрессии авторами сделан вывод о существенном влиянии на ВРП Санкт-Петербурга объема грузоперевозок порта, пассажиропотока аэропорта и объема импорта товаров.

В научной литературе имеется значительное количество работ, посвященных влиянию крупных логистических платформ на социально-экономические показатели региона. Например, в работе [18] N. Jiang показал существенное влияние инвестиций в инфраструктуру морских портов на экономический рост в Китае, а Song L. и Mi, J. [18, с. 270] для отдаленных районов Китая установили долгосрочную причинно-следственную связь между уровнем развития портовой инфраструктуры и экономическим развитием провинций.

В исследовании Song, L. и Van Geenhuizen [19] оценивалось влияние инвестиций в портовую инфраструктуру в Китае на объем производства в соответствующих регионах. Полученные результаты показали рост объемов производства в провинциях, где наблюдался приток инвестиций в портовую инфраструктуру. К аналогичному выводу пришли и ученые из Испании X. Fageda и M. Gonzalez-Aregall [20, с. 77]. На основе регрессионной модели они пришли к выводу, что развитие портов оказало ключевое влияние на занятость в промышленности в Испании с 1995 по 2008 год. Таким образом, система управления макро-логистической инфраструктурой субъекта страны позволяет оказывать существенное влияние на экономику региона.

Система управления макро-логистической инфраструктурой субъекта федерации представляет собой синтез организационно-функциональной структуры макро-логистической системы региона и математических моделей оптимального формирования основной и обеспечивающей (поддерживающей) составляющей логистической инфраструктуры, с помощью которых принимаются оптимизационные решения в области построения каналов и цепей распределения материальных потоков. В научной литературе под логистической инфраструктурой принято понимать «комплекс взаимосвязанных элементов, обеспечивающих функционирование системы закупок, поставок, хранения и доставки продукции до потребителя» [1, 2]. Среди научных публикаций под комплексом часто понимают совокупность основной и обеспечивающей составляющей логистической инфраструктуры [3–5]. К основной составляющей относят ключевые объекты складской и транспортной инфраструктур, обеспечивающей – ИКТ и финансовой сферы региона [5]. К задачам, решаемым в рамках системы управления логистической инфраструктурой субъекта страны, следует отнести поиск оптимальных мест расположения ключевых объектов транспортной и складской инфраструктур, их мощностей, а также выбор товароносителя.

Важным элементом системы управления макро-логистической инфраструктурой региона является контроллинг принимаемых решений. Результат контроллинга – оценка эффективности функционирования региональной логистической инфраструктуры после оказания влияющего воздействия.

Методы оценки уровня логистической инфраструктуры. Наиболее известной методикой оценки уровня развития логистической инфраструктуры следует признать индекс LPI Всемирного банка, основанный на расчете интегрального показателя, включающего шесть комплексных составляющих. Количественное значение индекса эффективности логистики позволяет оценить уровень развития логистической системы страны, в том числе и транспортной инфраструктуры, сравнить с ее другими странами и проследить динамику изменения эффективности логистики в мире. Для расчета индекса LPI используются данные опроса руководителей крупных международных компаний в области оказания логистических услуг и специалистов в области логистики.

Для оценки качества транспортной инфраструктуры можно воспользоваться методикой [6], разработанной Министерством транспорта РФ в рамках программы «Развитие транспортной системы». Данная методика представляет собой алгоритм расчета интегрального показателя, характеризующего уровень развития транспортно-логистической инфраструктуры как Российской Федерации, так и ее субъектов. Он рассчитывается как сумма произведения индексов качества автомобильной, железнодорожной, авиационной и водной инфраструктуры на объем работы соответствующих транспортных средств.

Количественное значение индексов предполагается определять на основе экспертного опроса специалистов в области транспорта по вопросам, связанным с уровнем развития объектов транспортно-логистической инфраструктуры.

Необходимо отметить, что рассмотренные выше методики основаны на данных опросов, что не исключает субъективности получаемых данных.

Для оценки уровня развития логистической инфраструктуры региона А. Н. Рахангулов и О. А. Копылова [7] выделяли показатели, объединенные в пять групп факторов: социально-экономические, территориальные, инфраструктурные, политические и нормативно-правовые и характеристики, относящиеся к деятельности транспорта. В группу территориальных факторов были включены показатели, связанные с климатической зоной территории и количеством транспортных коридоров; инфраструктурных – плотности автомобильных и железных дорог, состояния транспортной коммуникации; транспортной работы – значения грузооборота всех видов транспорта. Далее на основании предложенной авторами методики рассчитывался интегральный показатель оценки уровня развития логистической инфраструктуры региона. К недостаткам данного подхода следует отнести субъективность данных в группе инфраструктурных факторов, а также необходимость проведения сравнительного анализа расчетных интегральных показателей нескольких регионов для оценки логистической инфраструктуры изучаемого субъекта Российской Федерации [7]. Кроме этого, вызывает сомнение необходимость учета климатической зоны, а также отсутствие показателей обеспечивающей составляющей в рамках системы управления макро-логистической инфраструктурой.

В работе F. Carlucci и других авторов [8] оценку уровня развития логистической инфраструктуры предлагается проводить на основе расчета индексов деятельности автомобильного, воздушного, железнодорожного и водного транспорта. Наряду с этим авторы учитывали стоимость объектов логистической инфраструктуры, количество специалистов в области логистики, а также инвестиции в человеческий капитал. Предложенный F. Carlucci с соавторами [8] подход также основан на анализе основной составляющей инфраструктуры и практически не учитывает влияние обеспечивающей составляющей.

В других работах [9–13] предлагается только косвенная оценка региональной инфраструктуры в рамках решения задач, связанных с развитием субъекта страны. В указанных статьях рассматриваются преимущественно показатели деятельности транспорта без учета влияния финансовой и информационной составляющей. Например, в работе О. Поповой [22] предложена методика оценки транспортной инфраструктуры субъекта страны на основе анализа транспортной составляющей муниципальных образований. Предложенная автором методика включает в себя следующие шаги: выбор показателей, характеризующих транспортную деятельность муниципальных образований по видам транспорта; нормализация исходных данных; сегментирование муниципальных образований в группы со схожими значениями изучаемых показателей с помощью кластерного анализа; анализ групп.

Алгоритм оценки уровня логистической инфраструктуры. Система управления макро-логистической инфраструктурой субъекта страны, состоящая из системы администрирования (региональный орган исполнительной власти) и региональной логистической инфраструктуры, рассматривается как ключевой драйвер повышения инвестиционной привлекательности субъекта страны, его межрегиональной интеграции и социально-экономического развития [5]. Важным элементом функционирования данной системы является оценка качества в рамках системы контроллинга принимаемых решений в области определения мест расположения ключевых объектов основной и обеспечивающей составляющей логистической инфраструктуры, их мощности

и количества, а также снижения барьеров при построении сетей распределения и цепей поставок на территории субъекта Российской Федерации частными инвесторами.

Для оценки эффективности принимаемых решений в рамках системы управления макро-логистической инфраструктурой субъекта страны необходимо измерение результатов решений, принимаемых исполнительным органом государственной власти, которое обеспечивает обратную связь, необходимую для функционирования эффективного управления. Необходимо отметить, что контроль принятия управленческих решений будет эффективен только при учете реальных результатов и возможностей региона. Использование статистических данных, а не результатов опроса, позволит избежать субъективности в оценке результата принятых управленческих решений.

В настоящей работе оценку эффективности принимаемых решений в системе управления макро-логистической инфраструктурой региона предлагается проводить на основе расчета интегрального показателя, включающего индексы, связанные с деятельностью ключевых объектов основной и обеспечивающей составляющей. Алгоритм оценки уровня логистической инфраструктуры региона представлен на рисунке 1.

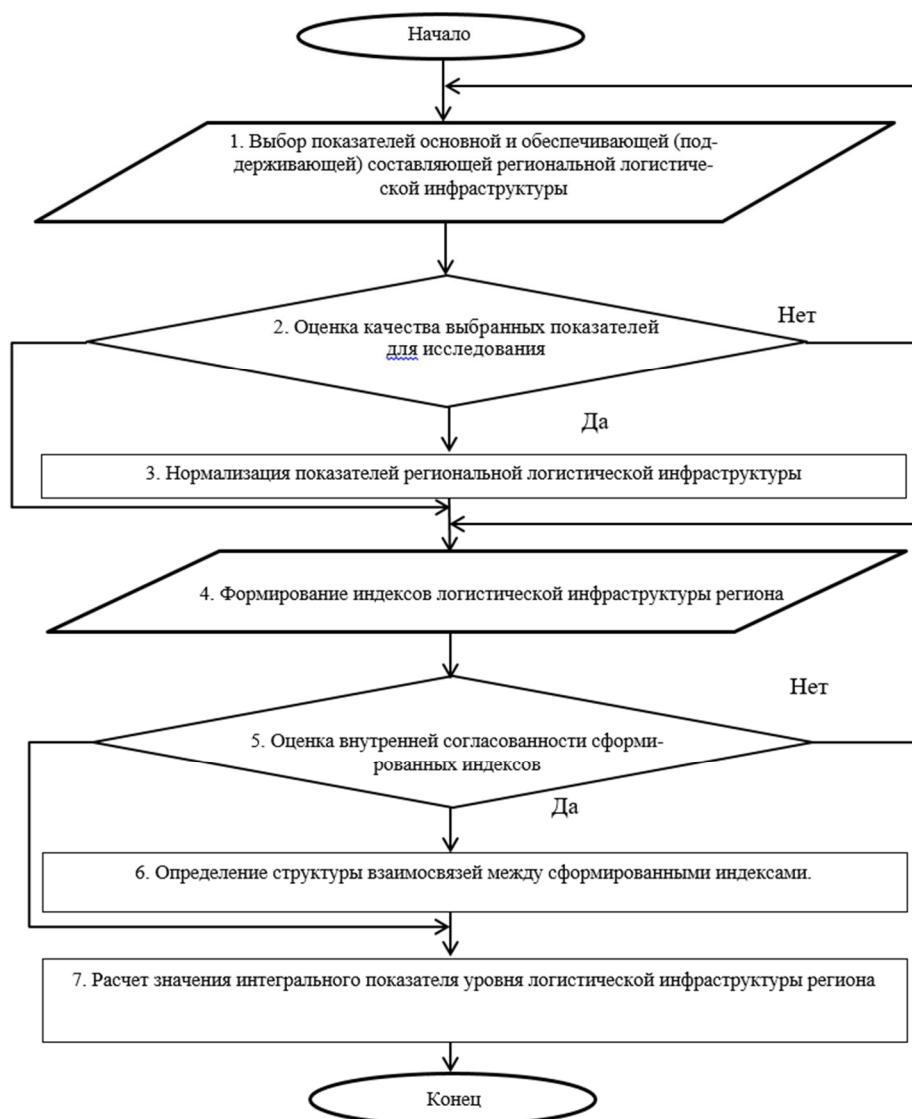


Рисунок 1 – Алгоритм оценки уровня логистической инфраструктуры региона

Вследствие того, что параметры региональной логистической инфраструктуры выражены в разных шкалах, необходимо провести их нормализацию. Для этого каждое значение в выборке необходимо преобразовать в z-оценки по формуле:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma},$$

где z_i – расчетное значение в выборке; x_i – исходное значение в выборке; $\bar{x}$ – среднее значение в исследуемой выборке; σ – стандартное отклонение в выборке.

В результате реализации данного шага будут определены показатели, выраженные в одной шкале измерения, позволяющие оценить эффективность принимаемых решений исполнительным органом государственной власти в рамках системы управления макро-логистической инфраструктурой региона.

После оценки качества выбранных показателей логистической инфраструктуры и приведения к одной шкале измерения проводится их группировка в индексы. Индексы формируются по видам транспорта, объектам финансовой и информационной деятельности, экспортно-импортным операциям, видам инвестиций, обороту розничной торговли и т.д. Количественные значения индекса по годам рассчитываются как сумма соответствующих годовых значений показателей, отнесенных в данный индекс. Количество индексов должен быть примерно в три раза меньше объектов для исследования.

После объединения характеристик логистической инфраструктуры в индексы необходимо провести оценку внутренней согласованности индексов с помощью коэффициента α -Кронбаха. Внутренняя согласованность считается приемлемой, если значение коэффициента не превышает 0,7. В противном случае предполагается сильная зависимость индексов друг от друга, а, соответственно, наличие избыточных переменных в проводимом исследовании. Если значение коэффициента α -Кронбаха превышает 0,7, то необходимо построить матрицу интеркорреляций индексов и исключить из дальнейшего рассмотрения индекс, имеющий наибольшее количество значений коэффициента корреляций Пирсона свыше 0,7. Кроме этого, возможно, изменение условий формирования индексов в зависимости от выбранных показателей с целью учета влияния принимаемых решений на все составляющие логистической инфраструктуры.

Если в рамках проводимого исследования нет необходимости в оценке степени выраженности сформированных индексов и выявления дисбаланса в развитии транспортной или складской инфраструктур, то следующий шаг необходимо пропустить и перейти к расчету значения интегрального показателя эффективности логистической инфраструктуры региона. В противном случае следует провести оценку взаимосвязи между индексами.

Для определения структуры взаимосвязи между индексами предлагается использовать факторный анализ. В качестве метода исследования – метод анализа главных компонент. Метод вращения – варимакс с нормализацией Кайзера. В результате будут получены факторные нагрузки сформированных индексов и объектная диаграмма распределения, позволяющая сравнить степень выраженности факторов для включенных в исследование субъектов.

Для оценки эффективности логистической инфраструктуры региона предлагается использовать интегральный показатель, рассчитываемый по формуле:

$$I = \sum_{i=1}^N k * X_i * F,$$

где k – значимость соответствующего индекса; X_i – степень выраженности фактора для субъекта; F – наибольшее значение факторной нагрузки соответствующего индекса.

Значимость индексов можно определить с помощью метода весовых характеристик по формуле

$$R_i = \frac{2(N-i+1)}{N(N+1)},$$

где R_i – весовой коэффициент сформированного индекса; N – количество сформированных индексов; i – ранг индекса.

Исходя из вышеизложенного, предложенный алгоритм позволяет не только оценить эффективность принимаемых решений в рамках системы управления макро-логистической инфраструктурой субъекта страны, но и способен выявить дисбаланс в уровне развития звеньев региональной логистической инфраструктуры.

Заключение. Таким образом, в работе предложен алгоритм расчета интегрального показателя уровня логистической инфраструктуры региона. Алгоритм включает в себя следующие шаги: выбор показателей основной и обеспечивающей составляющей региональной логистической инфраструктуры; их проверка на избыточность (соответствие распределению данных в выборках нормальному закону распределения, проверка на мультиколлинеарность); проведение нормализации полученных параметров; формирование индексов логистической инфраструктуры региона, проверка их на внутреннюю согласованность и определение структуры взаимосвязи; расчет интегрального показателя. Алгоритм основан на анализе статистических данных, что исключает субъективности получаемых данных. Кроме этого, при исследовании учитываются не только показатели основной составляющей, но и параметры обеспечивающей составляющей логистической инфраструктуры. Использование предложенного алгоритма также позволяет оценить сбалансированность развития основной и обеспечивающей составляющей региональной логистической инфраструктуры.

Библиографический список

1. Сергеев, В. И. Прозрачность цепи поставок: терминологические аспекты и ценность для контрагентов цепи / В. И. Сергеев, И. В. Сергеев // *Логистика и управление цепями поставок*. – 2020. – № 4. – С. 3–13.
2. Сверчков, П. А. Анализ применимости существующих подходов к проектированию сети распределения для компаний сетевой розничной торговли / П. А. Сверчков // *Логистика и управление цепями поставок*. – 2017. – № 1 (78). – С. 98–106.
3. Попов, П. В. Оценка взаимосвязи показателей транспортно-логистической инфраструктуры и социально-экономического развития региона / П. В. Попов // *Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник*. – 2018. – № 8. – С. 3–6.
4. Манунин, А. Логистический подход к инфраструктуре как фактор экономического развития региона / А. Манунин // *Логистика*. – 2012. – № 11. – С. 22–24.
5. Попов, П. В. Оценка влияния логистической инфраструктуры на социально-экономические показатели Астраханской области / П. В. Попов // *Логистика*. – 2019. – № 1 (146). – С. 46–50.
6. Об утверждении Методики расчёта показателей (индикаторов) государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы», транспортной части комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года и федеральных проектов, входящих в его состав (ред. от 30.04.2019). – Режим доступа: <http://www.gks.ru/metod/naz-proekt/MET130000.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.05.2021).
7. Рахмангулов, А. Н. Оценка социально-экономического потенциала региона для размещения объектов логистической инфраструктуры / А. Н. Рахмангулов, О. А. Копылова // *Экономика региона*. – 2014. – № 2. – С. 254–263.
8. Carlucci, F. et al. Infrastructure and logistics divide: regional comparisons between North Eastern & Southern Italy / F. Carlucci et al. // *Technological and Economic Development of Economy*. – 2017. – № 23 (2). – P. 243–269.
9. Alireza, Ardalan. An Efficient Heuristic for Service Facility Location / Alireza Ardalan // *Proceedings, Northeast Decision Sciences Institute Conference*. – 1984. – P. 181–182.
10. Rutten, W. G. M. M. The Extension of GOMA Model for Determining the Optimal Number of Depots / W. G. M. M. Rutten, P. J. M. Van Laarhoven, B. Vos // *IIE Transactions*. – 2001. – Vol. 33, iss. 11. – P. 1031–1036.
11. Кокурин, Д. И. Влияние логистической инфраструктуры на состояние экономики: региональный аспект / Д. И. Кокурин, К. Н. Назин // *Логистика и управление цепями поставок*. – 2011. – № 4 (45). – С. 57–97.
12. Pinar, Hayaloglu. The Impact of Developments in the Logistics Sector on Economic Growth: The Case of OECD Countries / Pinar Hayaloglu // *International Journal of Economics and Financial Issues*. – 2015. – № 5 (2). – P. 523–530.
13. Megiddo, N. On the complexity of some common geometric location problems / N. Megiddo, K. J. Supowit // *Siam J. Comput.* – 1984. – Vol. 13, № 1. – Feb.
14. Raimbekov, Zh. Evaluating the impact of logistics infrastructure on the functioning and development of regional economy / Zh. Raimbekov, B. Syzdykbayeva, A. Baimbetova & Zh. Rakhmetulina // *Economic Annals-XXI*. – 2016. – № 160 (7–8). – P. 100–104.
15. Логинова, Е. В. Развитие логистической инфраструктуры как фактор формирования инновационной модели экономики в условиях нестабильности / Е. В. Логинова, П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // *Новости науки и технологий*. – 2016. – № 3 (38). – С. 16–23.
16. Попов, П. В. Методология построения логистической инфраструктуры на территории региона / П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // *Экономика региона*. – 2019. – Т. 15, вып. 2. – С. 483–492. – DOI: 10.17059/2019-2-13.
17. Попов, П. В. Эффективное размещение распределительно-подсортировочных складов на территории региона / П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий, Е. В. Логинова // *Экономика региона*. – 2017. – Т. 13, вып. 3. – С. 871–882. – DOI: 10.17059/2017-3-19.
18. Song, L. Port infrastructure and regional economic growth in China: A granger causality analysis / L. Song, J. Mi // *Marit. Policy Manag.* – 2016. – № 43. – P. 456–468.
19. Song, L. Port infrastructure investment and regional economic growth in China: Panel evidence in port regions and provinces / L. Song, M. Van Geenhuizen // *Transp. Policy*. – 2014. – № 36. – P. 173–183.
20. Fageda, X. Do all transport modes impact on industrial employment? Empirical evidence from the Spanish regions / X. Fageda, M. Gonzalez-Aregall // *Transp. Policy*. – 2017. – № 55. – P. 70–78.
21. Гольская, Ю. Н. Оценка влияния транспорта на социально-экономическое развитие регионов / Ю. Н. Гольская, И. А. Кузнецова // *Известия ИГЭА*. – 2010. – № 5. – С. 61–64.
22. Popova, Olga. Algorithms of data clustering in assessing the transport infrastructure of the region / Olga Popova, Elena Kuznetsova, Tatiana Sazonova // *Business Technologies for Sustainable Urban Development : International Science Conference SPbWOSCE-2017*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817005006>.

References

1. Sergeev, V. I., Sergeev, I. V. Prozhrachnost tsepi postavok: terminologicheskie aspekty i tsennost dlya kontragentov tsepi [Transparency of the supply chain: terminological aspects and value for counterparties in the chain]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and Supply Chain Management], 2020, no. 4, pp. 3–13.
2. Sverchkov, P. A. Analiz primenimosti sushchestvuyushchikh podkhodov k proektirovaniyu seti raspredeleniya dlya kompanii setevoy roznichnoy trgovli [Analysis of an Applicability of Existing Approaches to the Distribution Network Design for Retail]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and Supply Chain Management], 2017, no. 1 (78), pp. 98–106.

3. Popov, P. V. Otsenka vzaimosvyazi pokazateley transportno-logisticheskoy infrastruktury i sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya regiona [Assessment of the relationship between indicators of transport and logistics infrastructure and socio-economic development of the region]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie : nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management : scientific information collection], 2018, no. 8, pp. 3–6.
4. Manunin, A. Logisticheskoy podkhod k infrastrukture kak faktor ekonomicheskogo razvitiya regiona [Logistic approach to infrastructure as a factor in the economic development of the region]. *Logistika* [Logistics], 2012, no. 11, pp. 22–24.
5. Popov, P. Otsenka vliyaniya logisticheskoy infrastruktury na sotsialno-ekonomicheskie pokazateli Astrahanskoy oblasti [Assessment of the impact of the logistics infrastructure on the socio-economic indicators of the Astrakhan region]. *Logistika* [Logistics], 2019, no. 1 (146), pp. 46–50.
6. Ob utverzhdenii Metodiki rasschetya pokazateley (indikatorov) gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii «Razvitie transportnoy sistemy», transportnoy chasti kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistralnoy infrastruktury na period do 2024 goda i federalnykh proektov, vkhodyashchikh v ego sostav, red. ot 30.04.2019 [On the approval of the Methodology for calculating indicators (indicators) of the state program of the Russian Federation "Development of the transport system", the transport part of the comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infrastructure for the period until 2024 and federal projects that are part of it, as revised on April 30, 2019. Available at: <http://www.gks.ru/metod/naz-proekt/MET130000.pdf> (accessed 14.05.2021).
7. Rahmangulov, A. N., Kopylova, O. A. Otsenka sotsialno-ekonomicheskogo potentsiala regiona dlya razmeshcheniya obektov logisticheskoy infrastruktury [Assessment of the socio-economic potential of the region for the placement of logistics infrastructure facilities]. *Ekonomika regiona* [Economy of the Region], 2014, no. 2, pp. 254–263.
8. F. Carlucci et al. Infrastructure and logistics divide: regional comparisons between North Eastern & Southern Italy. *Technological and Economic Development of Economy*, 2017, no. 23 (2), pp. 243–269.
9. Alireza, Ardalan. An Efficient Heuristic for Service Facility Location. *Proceedings, Northeast Decision Sciences Institute Conference*, 1984, pp. 181–182.
10. Rutten, W. G. M. M., Van Laarhoven, P. J. M., Vos, B. The extension of GOMA model for determining the optimal number of depots. *IIE Transactions*, 2003, no. 33, pp. 1031–1036.
11. Kokurin, D. I., Nazin, K. N. Vliyanie logisticheskoy infrastruktury na sostoyanie ekonomiki: regionalnyy aspekt [Influence of logistics infrastructure on the state of the economy: regional aspect]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and Supply Chain Management], 2011, no. 4 (45), pp. 57–97.
12. Pinar, Hayaloglu. The Impact of Developments in the Logistics Sector on Economic Growth: The Case of OECD Countries. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 2015, no. 5 (2), pp. 523–530.
13. Megiddo, N., Supowit, K. J. On the complexity of some common geometric location problems. *Siam J. Comput.*, 1984, vol. 13, no. 1, Feb.
14. Raimbekov, Zh., Syzdykbayeva, B., Baimbetova, A., & Rakhmetulina, Zh. Evaluating the impact of logistics infrastructure on the functioning and development of regional economy. *Economic Annals-XXI*, 2016, no. 160 (7–8), pp. 100–104.
15. Loginova, E. V., Popov, P. V., Miretskiy, I. Yu. Razvitie logisticheskoy infrastruktury kak faktor formirovaniya innovatsionnoy modeli ekonomiki v usloviyakh nestabilnosti [Development of logistics infrastructure as a factor in the formation of an innovative model of the economy in the context of instability]. *Novosti nauki i tekhnologii* [Science and Technology News], 2016, no. 3 (38), pp. 16–23.
16. Popov, P. V., Miretskiy, I. Yu. Methodology for Constructing the Region's Logistics Infrastructure [Methodology for building a logistics infrastructure in the region]. *Ekonomika regiona* [Economy of Region], 2019, no. 15 (2), pp. 483–492.
17. Popov, P. V., Miretskiy, I. Yu., Loginova, E. V. Effektivnoe razmeshchenie raspredelitelno-podsortirovochnykh skladov na territorii regiona [Efficient Location of Distribution Centres and Warehouses in the Territory of a Region]. *Ekonomika regiona* [Economy of Region], 2017, no. 13 (3), pp. 871–882.
18. Song, L., Mi, J. Port infrastructure and regional economic growth in China: A granger causality analysis. *Marit. Policy Manag.*, 2016, no. 43, pp. 456–468.
19. Song, L., Van Geenhuizen, M. Port infrastructure investment and regional economic growth in China: Panel evidence in port regions and provinces. *Transp. Policy*, 2014, no. 36, pp. 173–183.
20. Fageda, X., Gonzalez-Aregall, M. Do all transport modes impact on industrial employment? Empirical evidence from the Spanish regions. *Transp. Policy*, 2017, no. 55, pp. 70–78.
21. Golskaya, Yu. N., Kuznetsova I. A. Otsenka vliyaniya transporta na sotsialno-ekonomicheskoe razvitie regionov [Assessment of the impact of transport on the socio-economic development of regions]. *Izvestiya IGEA* [Izvestiya IGEA], 2010, no. 5, pp. 61–64.
22. Popova, Olga, Kuznetsova, Elena, Sazonova, Tatiana. Algorithms of data clustering in assessing the transport infrastructure of the region. *Business Technologies for Sustainable Urban Development : International Science Conference SPbWOSCE-2017*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817005006>.

УДК 004.832.2:004.023

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ТОРГОВЫХ ТОЧЕК ГОРОДА

Статья поступила в редакцию 19.05.2021, в окончательном варианте – 25.05.2021.

Кузнецов Михаил Андреевич, Волгоградский государственный технический университет
Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28,
кандидат технических наук, ORCID: 0000-0001-5044-1427, e-mail: mara122@mail.ru

Кравченко Павел Дмитриевич, Волгоградский государственный технический университет
Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28,
кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-1934-5792, e-mail: kpd_@mail.ru

Скринкович Виталий Сергеевич, Волгоградский государственный технический университет
Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28,
магистрант, ORCID: 0000-0002-5199-7299, e-mail: witalika.f3@gmail.com

Володченко Леонид Викторович, Волгоградский государственный технический университет
Российская Федерация, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28,
магистрант, ORCID: 0000-0002-2244-7693, e-mail: wolleo@mail.ru

В статье рассматриваются способы выбора оптимального места для расположения магазина розничной торговли с учетом множества географических факторов, влияющих на конкурентоспособность заведения. Информация для анализа извлекается из открытых геоинформационных систем. Описанная в статье методология предполагает сбор заданных географических данных в окружающем пространстве рядом с анализируемыми координатами. Близлежащее пространство определяется с помощью описанного в статье алгоритма. Данный алгоритм учитывает структуру дорог, расположение заборов, крупных построек, перепадов высот, ручьев и других ограничителей свободного передвижения. Извлечение информации происходит посредством запросов к API популярных картографических сервисов, таких как 2GIS, wikimapia и OpenStreetMap. Мера привлекательности торговой точки строится на основе информации о расположенных в окружающем пространстве жилых домах, наличии рядом организаций конкурентов, привлекательных городских достопримечательностей, а также проходящих рядом дорог и маршрутов общественного транспорта. Благодаря открытым финансовым источникам собранные данные дополняются информацией о денежных оборотах найденных организаций конкурентов. Производится обобщенная оценка привлекательности рассматриваемых торговых площадок и на основании комплексного расчета делается вывод о доминирующих вариантах. Для доминантного анализа используется методы ELECTRE.

Ключевые слова: СППР, ГИС, тепловая карта, ЛПП

USING A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FOR ANALYZING THE ATTRACTIVENESS OF URBAN TRADE LOCATION

The article was received by the editorial board on 19.05.2021, in the final version – 25.05.2021.

Kuznetsov Mikhail A., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-5044-1427, e-mail: mara122@mail.ru

Kravchenya Pavel D., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-1934-5792, e-mail: kpd_@mail.ru

Skrinkovich Vitaliy S., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation
undergraduate student, ORCID: 0000-0002-5199-7299, e-mail: witalika.f3@gmail.com

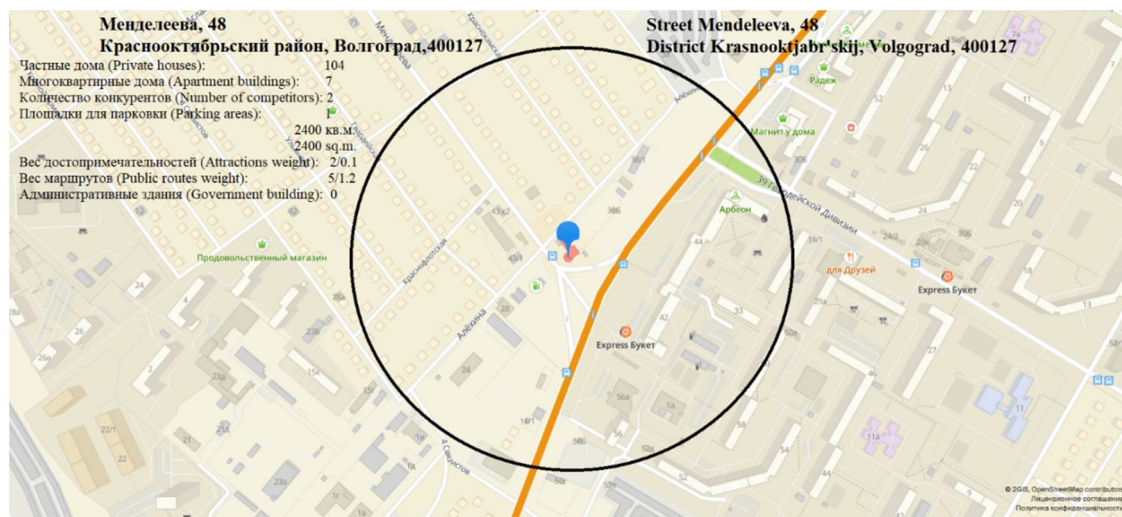
Volodchenkov Leonid V., Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,
undergraduate student, ORCID: 0000-0002-2244-7693, e-mail: wolleo@mail.ru

The article discusses ways of choosing the optimal location for a retail store, taking into account many geographic factors that affect the competitiveness of the establishment. Information for analysis is extracted from open geographic information systems. The methodology described in the article involves the collection of specified geographic data in the surrounding space next to the analyzed coordinates. The nearby space is determined using the

algorithm described in the article. This algorithm takes into account the structure of roads, the location of fences, large buildings, elevation differences, streams and other restrictions on free movement. Information is retrieved through API requests of popular map services such as 2GIS, wikimapia, and OpenStreetMap. The attractiveness measure of a retail outlet is based on information about the residential buildings located in the surrounding space, the presence of competitors' organizations, attractive city attractions, as well as the nearby roads and public transport routes. Thanks to open financial sources, the collected data is supplemented with information on the money turnover of the found competitors' organizations. A generalized assessment of the attractiveness of the trading platforms under consideration is made and, on the basis of a comprehensive calculation, a conclusion is made about the dominant options. ELECTRE methods are used for dominant analysis.

Keywords: DSS, GIS, heatmap, decision maker

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Сеть интернет обладает огромным массивом оцифрованных данных. Анализ публично доступной информации позволяет реализовывать принятие решения с низкой стоимостью получения данных для обработки. Однако основные проблемы применения систем, основанных на информации из глобальной сети, кроются в обосновании достоверности данных, а также в сложности разработки формальных моделей извлечения информации [1]. Существуют множество открытых сервисов, позволяющих существенно облегчить принятие решения или сформировать рекомендации для принятия решения. По своей сути такие информационные системы являются системами поддержки принятия решения (СППР). Популярны и массово используются такие как Яндекс Маркет, Яндекс Недвижимость, Яндекс Услуги, Циан, Авито, Юла, ДомКлик и так далее. Приведем несколько ссылок: <https://yandex.ru/all>, <https://youla.ru/>, <https://cian.ru/>, <https://www.avito.ru/rossiya/nedvizhimost>, <https://domclick.ru/>. Подобные сервисы можно классифицировать как гибрид поисковой системы и СППР. С одной стороны, поисковый модуль анализирует предложения на электронных ресурсах, фильтрует данные на основе запроса пользователя. Это особенность поисковых систем. С другой стороны, предложения ранжируются на основе выбранной модели принятия решения в зависимости от предпочтений лица принимающего решение (ЛПР). А это уже функция СППР. Модели ранжирования приведенных примеров достаточно просты. Это сортировка по ценам предложений, по отзывам или же по популярности анализируемого предложения.

Модель извлечения необходимой информации для систем СППР подразумевает четкую структуризацию запроса и ответа. Иначе сложно использовать разнородную информацию в обобщенной математической модели принятия решения. Для выборки структурированной информации требуется подсистема, которая выполнит такую предварительную обработку. С этой точки зрения на роль источников информации в первую очередь напрашиваются специализированные поисковые системы. Большинство же современных поисковых систем ориентированы на обработку текстовой информации. Поэтому для задействования выборки данных из такой системы потребуется использование семантических, нейролингвистических и онтологических моделей обработки текстовых данных [2]. В качестве источников информации также могут служить специализированные информационные сервисы, ориентированные на определенный класс задач. Например, сервисы биржевые, метеосервисы, сервисы, связанные с массовым обслуживанием потребителей (питание, развлечение, движение транспорта) [3, 9].

Один из активно используемых для поиска систем – это класс геоинформационных систем (ГИС). ГИС имеют четкие модели представления информации, что позволяет довольно просто извлекать численную информацию для анализа.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу выбора наиболее привлекательного места для открытия магазина, торгующего товарами массового потребления. На выбор места расположения магазина влияют множество факторов. Информацию о большинстве из этих факторов можно получить из геоинформационной системы в прямом или косвенном виде. Для уточнения некоторых параметров потребуются подключение дополнительных сервисов. В разрабатываемой модели принятия решения мы будем учитывать следующие критерии:

1. Учет расположенных рядом жилых домов.
2. Нахождение вблизи магазинов-конкурентов.
3. Расположение рядом административных зданий, предприятий и развлекательных центров.
4. Близкие остановки общественного транспорта.
5. Крупные автодороги рядом и возможность парковки вблизи магазина.

На качественном уровне вышеперечисленные критерии адекватно описывают привлекательность территории для открытия торговой площадки. Первый показатель позволяет косвенно оценить количество местных потенциальных покупателей. Второй – влияние конкурентов. Оба показателя можно считать базовыми для анализа локальных факторов в целях учета привлекательности месторасположения магазина. Оставшиеся три показателя будут существенными для учета привлечения покупателей издалека. Т.е. могут считаться глобальными факторами, которые зависят от структурной информации о строении города. Информацию о всех перечисленных параметрах можно получить из геоинформационных систем.

Открытые ГИС API. Рассмотрим следующие системы, с помощью открытых API которых доступно извлечение рассмотренной выше информации.

2GIS API – имеет четыре важных механизма извлечения данных. API справочника позволяет получить данные о расположенных вблизи организациях в соответствии с поисковыми параметрами. Для принятия решения такие данные имеют косвенный характер. Например, уточнение некоторых параметров конкурентов, а также выборка групп конкурентов. Вторым механизмом – API геокодинга позволяет осуществлять поиск по названию и по типу геообъектов в определенной области. Данный API является основным для поиска и анализа окружения. Третий механизм, API транспорта, позволяет осуществлять две основные задачи: получать информацию о пунктах остановок общественного транспорта (с указанием видов транспорта, проходящих через остановку), а также получать маршруты следования общественного транспорта. Последнее косвенно позволяет оценить пассажиропоток, проходящий вблизи анализируемой области. Данный API критически важен для анализа критерия № 4. Четвертый механизм – API карт позволяет работать со структурой и связями между геообъектами [4, 10].

Альтернативный Wikimapia также имеет четыре основных категории API, представленных в формате трех видов запросов. Запрос Place.Getnearest – позволяет получить данные о ближайших к выбранной точке объектах. Результат запроса предоставляет собой идентификатор, заголовок, URL, местоположение и многоугольник каждого объекта. Также в результат включается расстояние от заданной точки. Запрос Place.Getbyarea возвращает все объекты в заданном полигоне. Запрос Place.Getbyid возвращает подробную информацию об объекте. Результат имеет блок «вложение» (attached), позволяющий узнать об организациях, связанных с выбранным объектом. Запрос Place.Search возвращает основную информацию об искомых геообъектах. Данный запрос может быть использован как предварительный. Для более подробного следует использовать Place.Getnearest [5, 11].

Overpass API – еще один удобный API для получения данных о геообъектах. Это программный интерфейс используется вместе с картами OpenStreetMap. Элементы выбираются в соответствии с критериями поиска. Например, тип объектов, расположение, близость от заданной точки, свойства тегов или комбинация указанных критериев. OpenStreetMap имеет еще одно существенное преимущество – это открытое программное обеспечение. Для OpenStreetMap есть возможность установить программное обеспечение на своих аппаратных средствах и таким образом полностью управлять скоростью доступа к информации [6, 12, 13].

Рассмотрим принципы извлечения данных из ГИС и методы вычисления показателей, которые используются для принятия решения о привлекательности той или иной городской торговой площадки.

Оценка критерия № 1, «учет расположенных рядом жилых домов», реализуется путем подсчета жилых помещений в округе. Для выбора торговой точки важно учесть количество потенциальных

покупателей. Необходимо анализировать количество жителей, проживающих на расстоянии пешей прогулки от анализируемого места. Для вычисления близлежащей зоны, в которой нужно учитывать жилые дома, нужно построить ограничительную линию, разделяющую пространство на ближнюю и дальнюю зоны. Это позволит учитывать жителей внутри зоны как потенциальных покупателей, расположенных в шаговой доступности. Также близлежащая зона позволит определить наличие конкурентов, остановок общественного транспорта, парковок, а также привлекаемые для потенциальных покупателей близкорасположенные объекты. Кроме того, анализ объектов лишь в близлежащей зоне существенно ограничивает количество рассматриваемых геообъектов при вычислении всех показателей. Объекты вне этой зоны считаются далекими, а потому их влиянием можно пренебречь.

Определение близлежащей зоны базируется на граничном условии – максимальном расстоянии анализируемых объектов от заданной точки. Оценим это расстояние в 200–300 метров. Однако близлежащую зону нельзя всегда описать как окружность. Структурные ограничения пространства: заборы, дороги, крупные постройки, реки и т. д. могут существенно уменьшить анализируемую зону. Фактически построение ограничивающей линии ведется путем вращения отрезка, закрепленного в анализируемой точке одним концом. Вычисляются расстояния до препятствий, ограничивающих радиальное перемещение пешехода по прямой от центра на заданную величину. Точки контакта отрезка с препятствиями формируют ограничивающие перемещение полигоны. Затем из этих точек контакта зона рекурсивно расширяется. Новые отрезки вращаются во всех точках контакта предыдущего отрезка с препятствиями. Длины новых отрезков вычисляются как разность длины предыдущего отрезка и расстояний до точек его контакта с препятствиями от центра вращения. Для второй итерации это будет разность первоначальной длины отрезка и расстояния от анализируемой точки до текущей точки контакта с ограничивающим полигоном. Фактически таким образом строится пространство, которое достижимо пешеходом в обход имеющихся препятствий. При этом ограничивается максимальное расстояние, которое пройдет пешеход. Близлежащая зона получается путем объединения пространств, полученных на всех итерациях.

Поясним работу алгоритма с помощью рисунка 1. На нем голубым цветом показана граница зоны пешей доступности на основании только лишь максимального расстояния от анализируемой точки. Эта граница представляет собой окружность. Уменьшение зоны с учетом ограничивающих полигонов и радиальных перемещений пешехода для первой итерации алгоритма выделено темно-синим цветом. Дороги ограничивают радиальное перемещение пешехода в двух направлениях. Однако пешеход может перейти трассу по переходу и идти далее по радиальному направлению. Переход через дорогу определяется как точка контакта радиального отрезка из анализируемого центра с дорогами (ограничивающими полигонами).

На второй итерации строится зона возможных радиальных перемещений пешехода после перехода автомобильной трассы. Радиус этой зоны ограничен разностью первоначально заданного расстояния и расстояния от анализируемой точки до перехода. Минувя переход, пешеход может изменить направление и попасть в зону, которая ограничена окружностью с центром, расположенным на переходе. Окружность на рисунке 1 показана фиолетовым цветом. На этой итерации алгоритма также ищутся ограничения на радиальные перемещения пешехода от перехода. Вычисляются новые ограничивающие полигоны.

На рисунке 1 видно, что новые полигоны являются элементами полигонов, полученных на первой итерации. Это границы городской магистрали. Так как нет новых точек пересечения нового отрезка с ограничивающими полигонами, то новых итераций алгоритма не будет. Объединением полученные на первой и второй итерации зоны. Граница объединенной зоны показана на рисунке 1 красным цветом. Это зона является близлежащей зоной с учетом ограничений городскими магистралями перемещений пешехода.

На каждой итерации при вычислении ограничений на радиальные перемещения можно пренебрегать объектами с малыми размерами, например, зданиями, газонами, дорогами местного назначения. Дополнительные расстояния на обход/переход таких препятствий считаем незначительными.

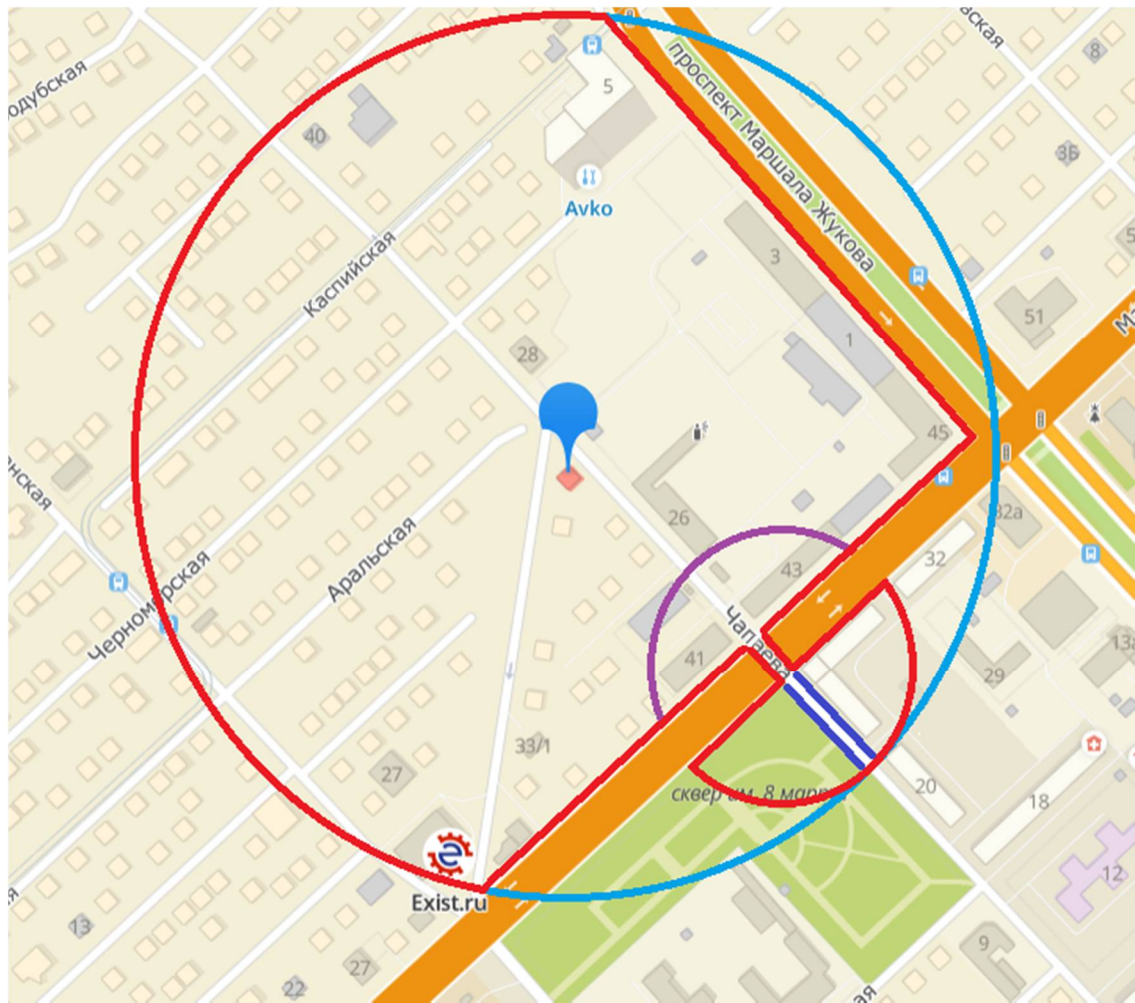


Рисунок 1 - Построение близлежащей зоны

Можно считать, что жильцы входящих в близлежащую зону домов будут являться потенциальными покупателями. Предполагаем, что количество жителей можно определить по типу, этажности и количеству подъездов жилых домов. Для частного сектора дом считаем жилищем для одной семьи, т.е. аналогом квартиры для многоквартирного дома. Дополнительное предположение о равномерной плотности заселения жилых площадей многоквартирного дома, позволяет считать количество потенциальных покупателей прямо пропорционально количеству лестничных клеток в многоквартирном доме: $Q_{ha} = Q_e * Q_l$, где Q_{ha} – количество лестничных клеток в доме, Q_e – количество подъездов в доме, а Q_l – количество этажей в доме. Аналогично для частных домов – количество потенциальных покупателей считаем пропорционально количеству самих домов. Оценка количества потенциальных покупателей будет линейно зависеть от суммы всех лестничных клеток в домах для многоквартирных домов и количества домов в частном секторе. Для сравнения мест с разной плотностью заселения (например, разные районы города) вводим поправочные коэффициенты, учитывающие среднее количество проживающих в одном частном доме и на одной лестничной клетке многоквартирного здания в заданном районе города. Таким образом получаем следующую формулу:

$$Q = (\sum_{H_n \in Z} (Q_e * Q_l)) * \rho_a + Q_{H_p \in Z} * \rho_p, \quad (1)$$

где Q – количество потенциальных покупателей; $H_n \in Z$ – множество многоквартирных домов, принадлежащих близлежащей зоне; Q_e – количество подъездов в доме; Q_l – количество этажей в доме; ρ_a – поправочный коэффициент, учитывающий плотность заселения лестничных клеток многоквартирных домов в данном районе города; $Q_{H_p \in Z}$ – количество частных домов, принадлежащих близлежащей зоне; ρ_p – поправочный коэффициент, учитывающий плотность заселения частных домов в данном районе города.

Учет критерия № 2 – «нахождение вблизи магазинов-конкурентов» ведется также на основе открытой информации ГИС. Принцип обработки может базироваться на разных стратегиях.

Первую стратегию назовем «оптимистической» (или «агрессивной»). ЛПР считает, что в конкурентной борьбе магазин имеет существенное преимущество. Приход на местный геосегмент новой торговой площадки позволит переманить клиентов существующих там магазинов. Агрессивный подход предполагает следующее. Чем больше магазинов-конкурентов расположено в рассматриваемой зоне, тем количество покупателей данных магазинов больше, тем выгоднее данное место. Такое допущение обусловлено априорно гарантированной возможностью привлечения клиентуры конкурентов. Можно считать, что наличие большего числа конкурентов в близлежащей зоне является положительным фактором. Конкуренты делят рынок имеющихся покупателей, а значит при оптимистической стратегии «чужие» покупатели гарантированно перейдут в разряд покупателей новой торговой точки. Причем фактор присутствия конкурентов вблизи при оптимистической стратегии является усиливающим показателем привлекательности рассматриваемого места. Образно можно считать, что данная зона «прикормлена» потенциальными покупателями. Существование магазинов-конкурентов предполагает их прибыльность, а значит, потенциальные покупатели в этом районе превращаются в гарантированных. «Гарантированного» покупателя можно считать более выгодным, чем вычисляемого на основании критерия №1 «потенциального» покупателя. Однако точная количественная оценка посещаемости покупателями конкурентов затруднена. Невозможно из любых открытых информационных систем извлечь количество покупателей у конкурентов. Однако можно воспользоваться дополнительной финансовой информацией об объемах торговых оборотов конкурентов. Обороты косвенно свидетельствует о посещаемости магазинов. Эти данные можно получить из открытых источников. Например, извлечь из опубликованного баланса. Информация размещается в следующих открытых источниках: <https://zachestnyibiznes.ru/how-to-use>, <https://kontragent.pro/>, <https://www.list-org.com/company>, <https://www.rusprofile.ru/>, <https://sbis.ru/contragents>. Она представляет собой численные данные о финансовых особенностях конкурентов. Сравнение совокупных оборотов конкурентов из близлежащей зоны позволит сделать выводы о привлекательности той или иной потенциальной торговой площадки. Ниже приведена формула учета торговых оборотов конкурентов:

$$T = \sum_{C \in Z} T_C, \quad (2)$$

где T – совокупный оборот конкурентов из близлежащей зоны; $C \in Z$ – магазины конкурентов из близлежащей зоны; T_C – оборот конкурента C . Чем выше этот показатель, тем привлекательнее торговая площадка с точки зрения агрессивной политики.

Вторая стратегия – «пессимистическая». Будем считать, что отбить клиентов у конкурентов невозможно, а значит, наличие конкурентов в зоне охвата считается отрицательным фактором, снижающим приоритетность рассматриваемого места. Конкуренты уменьшают количество потенциальных покупателей. Приоритетность места расположения торговой точки будет снижаться при увеличении объемов оборотов конкурентов, попадающих в обозначенную зону. Считаем, что формула 2, но только со знаком минус, используется в качестве показателя приоритетности площадки на основе сведений о конкурентах при пессимистической стратегии ЛПР.

Третья стратегия – использование модели «ленивых жителей» позволит применить принцип осмысленного поведения потенциальных покупателей. При одинаковой ценовой политике магазинов и одинаковом качестве их товаров покупатели будут выбирать наиболее близкую торговую точку, т.е. будут минимизировать свои перемещения. Следовательно, подсчет потенциальных покупателей заключается в учете жилых домов, расстояние до которых ближе, чем до магазинов конкурентов. Стратегия ленивых жителей модифицирует принцип анализа критерия № 1 – учет потенциальных покупателей. Расчет ведется на основании суммирования всех лестничных клеток многоквартирных домов, расстояние до которых меньше, чем до магазинов конкурентов. Аналогично анализируется размещение частных жилых домов. При этой стратегии фактически критерии № 1 и № 2 объединяются в один обобщенный критерий подсчета потенциальных покупателей по измененному принципу. Для расчета можно использовать формулу (1), добавив дополнительное условие фильтрации домов близлежащей зоны – учитываются только те дома, от которых расстояние до анализируемой точки ближе, чем до магазинов конкурентов. Следствием применения этой модели также является возможность произвести перерасчет объема продаж между конкурирующими в заданной зоне магазинами. Поэтому при известном объеме оборотов конкурентов, можно даже предположить о потенциальных «кусках пирога», которые достанутся от конкурентов. Эта доля будет пропорциональна количеству покупателей, которым станет ближе поход в новую торговую точку.

Расчет критерия № 3 – «расположение рядом административных зданий, предприятий и развлекательных центров», учитывает нахождение в близлежащей зоне объектов, привлекательных для потенциальных покупателей. Это могут быть помимо указанных в названии критерия объектов

также музеи, театры, парки, детские площадки, кинотеатры, памятники и другие достопримечательности города. Чем больше таких объектов, тем выгоднее данное место для торговой точки. Для этого критерия сложно оценить привлеченных людей количественно. Подавляющее большинство ГИС не обладают подобной информацией. Однако можно экспертным способом оценить привлекательность некоторых классов подобных объектов и учитывать совокупную привлекательность всех объектов данного класса в близлежащей зоне. Например, аддитивная свертка суммирует привлекательность объектов, выполняя роль объединения интереса к разным объектам разных потенциальных покупателей. Свертка проводится по множеству представленных классов объектов в близлежащей зоне. Следующая формула учитывает «интересность» объектов в близлежащей зоне:

$$A = \sum_K \sum_{O \in K \& O \in Z} \sigma_K, \quad (3)$$

где A – совокупный коэффициент привлекательности всех объектов в зоне; первая сумма – это сумма коэффициентов по всем классам привлекающих объектов K . Вторая сумма подсчитывает коэффициенты привлекательности объектов только класса K , где $O \in K \& O \in Z$ – объекты, принадлежащие определенному классу K (парки, зоны отдыха, кинотеатры и т. д.) и входящие в близлежащую зону; σ_K – экспертная оценка привлекательности объектов класса K с точки зрения потенциальных покупателей торговой площадки.

Например, для магазина сувениров такие геообъекты, как «исторические памятники» и «музеи», будут иметь высокий уровень σ_K . Для магазина игрушек высокое значение σ_K имеют объекты класса «детская площадка» и «кинотеатр». Другой вариант подсчета такой:

$$A = \sum_K Q_K * \sigma_K \quad (3a)$$

Считается сумма произведений по всем классам объектов K , где Q_K – количество в близлежащей зоне привлекательных объектов вида K , а σ_K – экспертная оценка привлекательности объекта вида K . Варианты расчета по формулам (3) и (3a) дают идентичные значения. Отличия кроются в порядке накопления привлекательности объектов одного класса.

Анализ критерия № 4 – «близкие остановки общественного транспорта» проводится по принципу учета проходящих через них маршрутов общественного транспорта. Вес каждого маршрута устанавливается экспертной оценкой на основании пассажиропотока. Фактически производится аддитивная свертка по пассажиропотокам маршрутов, проходящих через близлежащие остановки.

$$P = \sum_{R \in Z} W_R, \quad (4)$$

где W_R – экспертная оценка веса пассажиропотока маршрута R ; $R \in Z$ – маршрут проходит через остановку, принадлежащую близлежащей зоне.

Последний критерий № 5 – «крупные автодороги рядом и возможность парковки вблизи магазина» оценивается по принципу, похожему на учет остановок (4). Наличие парковок позволяет учитывать транспортные потоки по автодорогам, смежных с ними. Чем больший транспортный поток проходит по смежной с парковкой дороге, тем привлекательнее место. Однако есть и существенное отличие от принципа учета остановок. Остановка не ограничивает потенциальную пропускную способность входящих/выходящих пассажиров. А для подсчета приезжающих на собственных автомобилях потенциальных покупателей требуется учитывать вместимость парковок (или свободные площади рядом для организации парковки). Площадь парковок в близлежащей зоне выступает как основной параметр и определяет максимальное количество обслуживаемых в единицу времени приезжих покупателей. Транспортные потоки по смежным с парковкой дорогам определяют возможность проезда большого количества людей, а значит потенциально большего количества информированных о торговой площадке. Площадь парковки фактически определяет максимальную потенциальную скорость обслуживания приезжих покупателей (краткосрочное ограничение). Чем больше парковка, тем большее количество покупателей можно обслужить за единицу времени. Транспортные потоки по смежным с парковкой дорогам показывают возможное ограничение по количеству обслуживаемых покупателей за долгий период (долгосрочное ограничение). В результате объединения краткосрочных и долгосрочных ограничений получаем следующую формулу:

$$P = \sum_{P \in Z} (S_P * (\sum_{D \in P} W_D)), \quad (5)$$

где $P \in Z$ – парковки в близлежащей зоне; S_P – площадь парковки P ; $\sum_{D \in P} W_D$ – сумма экспертных весов приоритетности транспортных потоков по смежным с парковкой дорогам. В формуле (5) за кадром остается важный вопрос доступности парковки. В ряде случаев парковка по факту есть, но парковочные места на ней всегда заняты. Поэтому учитывать парковки в качестве привлекательности анализируемого места можно только в случае получения контроля за ними владельцами магазина или же существовании гарантии присутствия определенного количества свободных мест. Оценка возможностей парковки производится экспертным путем.

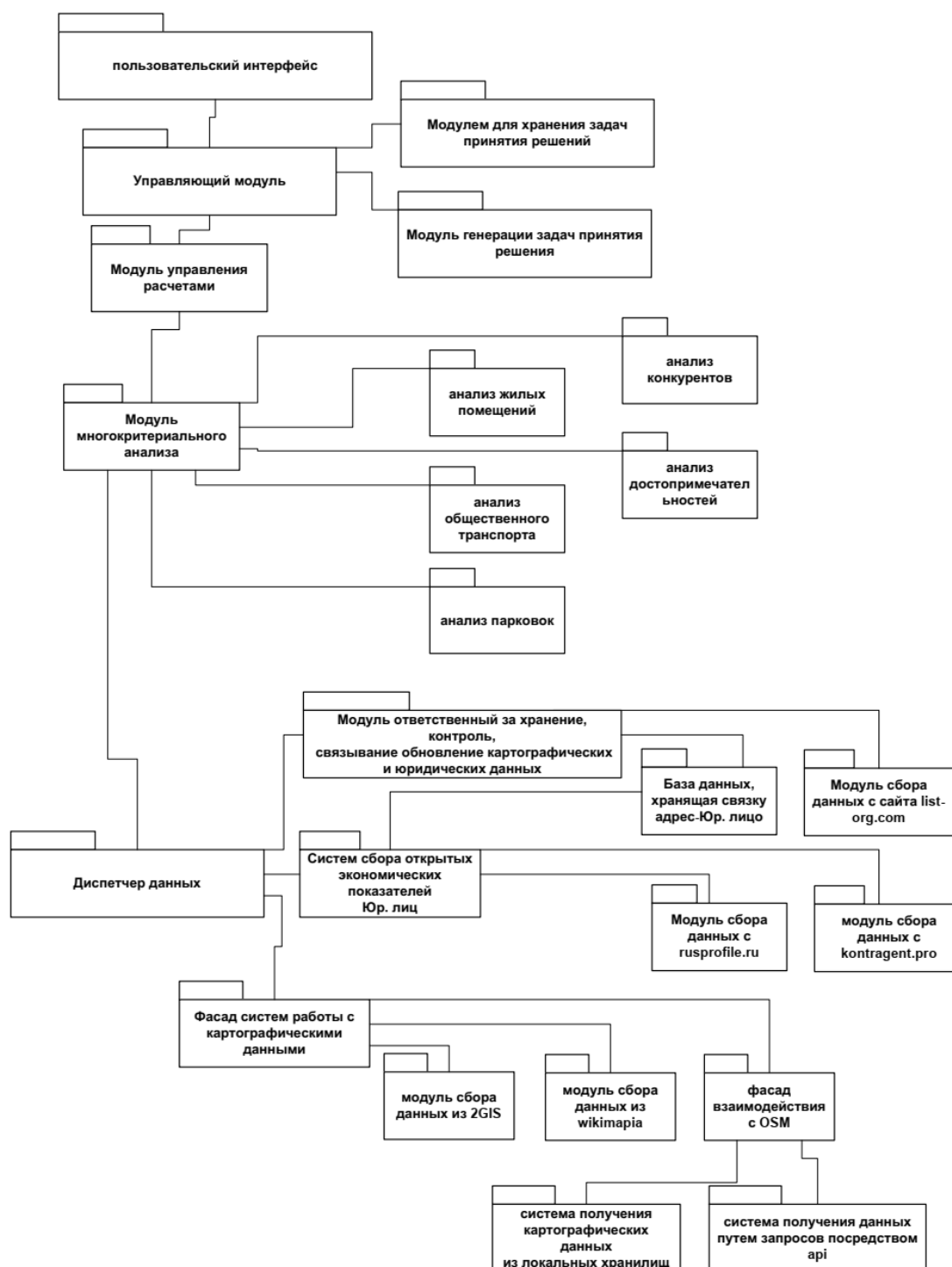


Рисунок 2 - Программная архитектура

Многокритериальный анализ. Таким образом, на основе ГИС, а также некоторых дополнительных информационных систем и экспертных оценках, можно автоматически вычислять пять предложенных выше показателей. Сравнение потенциальных площадок при выборе места для магазина легко выполняется по отдельным критериям. Однокритериальный выбор теоретически обоснован. Однако совокупный многокритериальный выбор затруднен из-за сложностей оценки важности критериев и их влияния друг на друга. Например, что лучше для магазина – наличие парковок или же остановок общественного транспорта вблизи? Это определяется ЛПП на основе его предпочтений исходя из специфики торговой площадки, а также выбранной стратегии.

Фактически для учета всех показателей гарантированно применяется анализ Парето-доминирования. Данный способ позволит отсеять заведомо худшие решения. Но когда строгое доминирование невозможно, нужно воспользоваться компромиссными подходами, учитывающими баланс преимуществ и недостатков по критериям. Для этого лучше всего подходят методы ELECTRE [7, 8].

Программная архитектура. Система на основе рассмотренной модели имеет представленную на рисунке 2 структуру программных модулей. СППР реализуется на расширяемой модульной архитектуре. За счет промежуточных абстракций, выполненных через паттерн «фасад», становится возможным использовать данные из разных источников. Это касается как информации ГИС, так и финансовых данных. Расчеты выполняются в отдельных от управления потоками информации модулях. Интерфейсы информационно-поисковых подсистем отделены от управляющего модуля. Это сделано с целью возможной замены сторонних сервисов, а также для возможного расширения способов анализа информации. Последнее может потребовать выполнения других алгоритмов запросов к сторонним системам. Также это позволяет верифицировать данные либо дополнять их информацией из новых источников.

Порядок работы. С позиции пользователей работа программной системы выглядит следующим образом. Формулируется задача принятия решения. Для этого вносится список координат потенциальных торговых площадок, а также дополнительные корректирующие параметры, такие как тип торговой организации (для определения конкурентов) и предпочитаемые методы расчетов. Предварительно экспертами оцениваются приоритетные веса городских маршрутов общественного пользования и транспортные потоки по основным городским магистралям. Модуль управления расчетами на основе формулировки задачи рассчитывает оценки указанных показателей для каждой внесенной позиции согласно выбранным стратегиям. Используя методы ELECTRE, определяются доминантные альтернативы. В случае получения высокого порога несравнимости коэффициенты согласия и несогласия ELECTRE ослабляются с целью выделения допустимого количества доминантных решений.

Заключение. Использование СППР на основе информации извлекаемой из открытых ГИС позволяет значительно снизить время и стоимость предварительного анализа альтернативных вариантов размещения торговой точки. Результат анализа представляет выборку одного или нескольких доминирующих решений для последующего утверждения ЛПР конкретного приоритетного расположения торговой площадки в городе. Алгоритмы и модели принятия решения представленной СППР возможно также использовать для упрощения генерации альтернативных решений. То есть можно также автоматически формировать оптимальные точки размещения торговых площадок в черте города. Для этого система должна равномерно (с определенной дискретностью) выделить точки для анализа внутри городской черты. Затем рассчитать привлекательность данных точек согласно приведенным в статье формулам. После интерполяции полученных значений по всему пространству города результаты расчета можно представить в виде тепловой карты (heatmap). Распределение оттенков цвета на карте обеспечивает когнитивное восприятие результатов расчета для ЛПР. Это позволяет ему сосредоточиться на поиске предложений о продаже или аренде торговых павильонов в наиболее выгодных районах города. Может быть также принято решение о строительстве торгового здания в определенном месте.

Библиографический список

1. Быканова, А. С. Разработка системы поддержки принятия решений на основе данных / А. С. Быканова, В. В. Соболе // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2017. – № 21–2. – С. 311–312.
2. Хортонен, А. А. Географические информационные системы как класс систем поддержки принятия решений при управлении пространственной информацией (на примере банковской сферы) / А. А. Хортонен // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычисл. техн. информ. – 2011. – № 1. – С. 195–199.
3. Stepniaka Cezary. Possibilities of Using GIS Technology for Dynamic Planning of Investment Processes in Cities / Cezary Stepniaka, Tomasz Turek // Procedia Computer Science. – 2020. – Vol. 176, № 2. – P. 3225–3234.
4. Будикин, А. Е. Современные тенденции, проблемы и перспективы развития географических информационных систем в России / А. Е. Будикин, Д. В. Андреев // Московский экономический журнал. – 2018. – № 5–3 –С. 16–19.
5. Marcos, M. R. Spatial Analysis to Identify Urban Areas with Higher Potential for Social Investment / Martines, Marcos & Toppa, Rogério & Ferreira, Ricardo & Cavagis, Alexandre & Kawakubo, Fernando & Morato, Rúbia // Journal of Geographic Information System. – 2017. – № 09. – P. 591–603.
6. Hossein, Aghajani. Identifying urban neighborhoods with higher potential for social investment using GIS-FIS approach / Hossein Aghajani & Ali Alizadeh-Zoeram // Applied Geomatics. – 2020. – № 13. – P. 1–13.
7. Ming-Che, Wu. The ELECTRE multicriteria analysis approach based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets / Ming-Che Wu, Ting-Yu Chen // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38, № 10. – P. 12318–12327.

8. Кузнецов, М. А. Использование методов ELECTRE в задачах принятия решения / М. А. Кузнецов, Т. У. Н. Нгуен // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2010. – № 2 (10). – С. 40–46.
9. Lomakin, N. I. Spark-Based Big Data Processing: AI to Decide on Opening a SiU9 Contract Position / N. I. Lomakin, P. D. Kravchenya, M. C. Maramygin, A. B. Shokhneh // Far East Con : proceedings of the International Scientific Conference (ISCFEC 2020) / ed. by Denis B. Solovev ; Far Eastern Federal University. – [Publisher: Atlantis Press], 2020. – P. 3283–3291.
10. API 2GIS // 2gis.ru. – Режим доступа: <https://content.2gis.ru/api>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 23.04.2021).
11. Wikimapia API // wikimapia.org. – Режим доступа: <http://wikimapia.org/api/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 23.04.2021).
12. Overpass API manual // overpass-api.de. – Режим доступа: <https://dev.overpass-api.de/overpass-doc/en/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 23.04.2021).
13. Кому на Руси жить хорошо? Как мы искали самый «зеленый» город с помощью OpenStreetMap и Overpass API // habr.com [IT блог]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/520524/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 23.04.2021).

References

1. Bykanova, S., Sobole, V. V. Razrabotka sistemy podderzhki prinyatiya resheniyna osnove dannykh [Development of a data-driven decision support system]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal* [Siberian Aerospace Journal], 2017, no. 21–2, pp. 311–112.
2. Horton, A. Geograficheskie informatsionnye sistemy kak klass sistem podderzhki prinyatiya resheniy pri upravlenii prostranstvennoy informatsiyey (na primere bankovskoy sfery) [Geographic information systems as a class of decision support systems for managing spatial information (on the example of the banking sector)]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnicheskaya informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series. Management series, computer technology informatics], 2011, no. 1, pp. 195–199.
3. Cezary, Stepniaka, Tomasz, Turek. Possibilities of Using GIS Technology for Dynamic Planning of Investment Processes in Cities. *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 176, no. 2, pp. 3225–3234.
4. Budikin, E. Andreev, D. V. Sovremennyye tendentsii, problemy i perspektivy razvitiya geograficheskikh informatsionnykh sistem v Rossii [Current trends, problems and prospects for the development of geographic information systems in Russia]. *Moskovskiy ekonomicheskoy zhurnal* [Moscow Economic Journal], 2018, no. 5–3, pp. 16–19.
5. Martines, Marcos & Toppa, Rogério & Ferreira, Ricardo & Cavagis, Alexandre & Kawakubo, Fernando & Morato, Rúbia. Spatial Analysis to Identify Urban Areas with Higher Potential for Social Investment. *Journal of Geographic Information System*, 2017, no. 09, pp. 591–603.
6. Hossein, Aghajani, Ali, Alizadeh-Zoeram. Identifying urban neighborhoods with higher potential for social investment using GIS-FIS approach. *Applied Geomatics*, 2020, no. 13, pp. 1–13.
7. Ming-Che, Wu, Ting-Yu, Chen. The ELECTRE multicriteria analysis approach based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. 38, no. 10, pp. 12318–12327.
8. Kuznetsov, M. A., Nguen, T. U. N. Ispolzovanie metodov ELECTRE v zadachakh prinyatiya resheniy [Using ELECTRE methods in Decision Making Problems]. *Prikaspiyskiy journal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2010, no. 2 (10), pp. 40–46.
9. Lomakin, N. I. Kravchenya, P. D., Maramygin, M. C., Shokhneh, A. B. Spark-Based Big Data Processing: AI to Decide on Opening a SiU9 Contract Position. *Far East Con : proceedings of the International Scientific Conference (ISCFEC 2020)* / ed. by Denis B. Solovev, 2020, pp. 3283–3291.
10. API 2GIS. Available at: <https://content.2gis.ru/api> (accessed 23.04.2021).
11. Wikimapia API. Available at: <http://wikimapia.org/api/> (accessed 23.04.2021).
12. Overpass API manual. Available at: <https://dev.overpass-api.de/overpass-doc/en/> (accessed 23.04.2021).
13. Кому на Руси жить хорошо? Как мы искали самый «зеленый» город с помощью OpenStreetMap и Overpass API [Who lives well in Russia? How we searched for the greenest city using OpenStreetMap and Overpass API]. Available at: <https://habr.com/ru/post/520524/> (accessed 23.04.2021).

УДК 371.39+004.4

**ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ¹***Статья поступила в редакцию 15.07.2021, в окончательном варианте – 23.07.2021.*

Ажмухамедов Искандар Маратович, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор технических наук, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности, профессор кафедры информационной безопасности, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9058-123X>, e-mail: aim_agtu@mail.ru

Кузнецова Валентина Юрьевна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

ассистент кафедры информационной безопасности и цифровых технологий, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: arhelial@bk.ru

Станишевская Алина Владимировна, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

ассистент кафедры информационной безопасности и цифровых технологий, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4539-5793>, e-mail: a.stanishevskaya@gmail.com

Статья посвящена процессу управления рисками при использовании цифровой образовательной среды на основе разработанной авторской методики и ее программной реализации. Утверждается, что использование цифровой образовательной среды может вызывать проявление у учащихся ряда рисков, связанных с их когнитивными, социальными и коммуникативными способностями. Подробно описывается общая логика работы разработанного веб-приложения, которое осуществляет опрос вербальных характеристик учащихся для вывода рисков по степени их актуальности, а также рекомендации по их минимизации. Использование на практике данного программного решения предусмотрено преподавателями средних, среднеспециальных и высших учебных заведений при оценке рисков внедрения дистанционного, электронного или смешанного обучения.

Ключевые слова: цифровая образовательная среда, дистанционное обучение, риски цифровизации образования, управление рисками

**RISK MANAGEMENT SOFTWARE
FOR USING A DIGITAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT***The article was received by the editorial board on 15.07.2021, in the final version – 23.07.2021.*

Azhmukhamedov Iskandar M., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Dean of the Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity, Professor of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID: 0000-00019058-123X, e-mail: iskander_agm@mail.ru

Kuznetsova Valentina Yu., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Assistant of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6954-5020>, e-mail: arhelial@bk.ru

Stanishevskaya Alina V., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

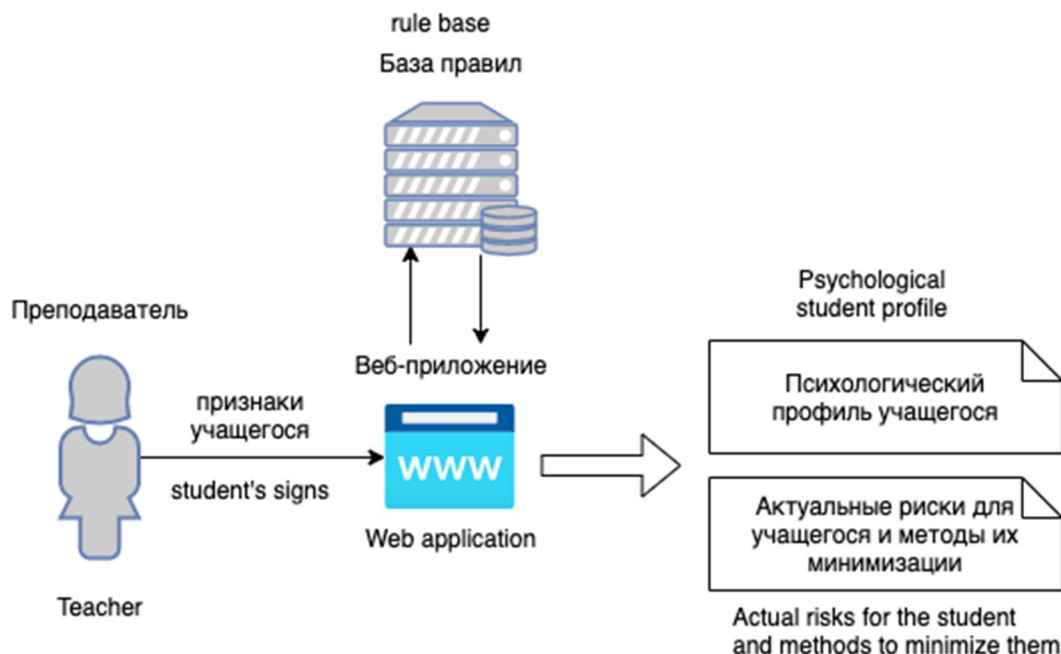
Assistant of the Department of Information Security and Digital Technologies, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4539-5793>, e-mail: a.stanishevskaya@gmail.com

The article is devoted to the process of risk management when using a digital educational environment based on the author's developed methodology and its software implementation. It is argued that the use of a digital educational environment can cause the manifestation of a number of risks in students related to their cognitive, social and communication abilities. The general logic of the developed web application is described in detail, which carries out a survey of the verbal characteristics of students in order to deduce risks according to their degree of relevance, as well as recommendations for their minimization. The use of this software solution in practice is provided for by teachers of secondary, specialized secondary and higher educational institutions when assessing the risks of introducing distance, e-learning or blended learning.

Keywords: digital educational environment, distance learning, risks of digitalization of education, risk management

¹Статья выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 19-29-14007 мк «Оценка влияния цифровизации образовательного и социального пространства на человека и разработка системы безопасной коммуникативно-образовательной среды».

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Развитие образовательного процесса не представляется возможным вне тренда цифровизации. Повсеместное внедрение цифровых технологий, с одной стороны, предоставляет новые инструменты для обучения, а с другой – задаёт новые требования, которым должен соответствовать современный выпускник школ, колледжей или вузов: как минимум, цифровая грамотность, которую необходимо овладевать с каждым годом все раньше и раньше. Внедрение «цифры» в образование не началось вчера – еще с 70-х годов прошлого века в мире, а в России с 90-х годов преподаватели различных учебных заведений так или иначе применяли дистанционные и электронные образовательные инструменты, поэтому педагогика накопила внушительный набор данных для анализа процесса цифровизации образования. И одним из выводов, который удалось получить различным ученым в рамках своих исследований, связанных с цифровым обучением, стал один существенный факт, который сложно игнорировать. Помимо преимуществ, которые несет цифровизация – доступность, экономичность, массовость образования, существует еще и ряд рисков для участников цифрового образовательного процесса. Исследования рисков и рискогенных факторов показывают [1–3], что введение цифровой образовательной системы само по себе порождает ряд рисков, которые угрожают обеспечению безопасности участников образовательной деятельности. Среди них выделяют:

Когнитивные риски. Под когнитивными рисками авторы исследования [4] понимают вероятность реализации угроз устойчивому гомеостатичному функционированию познавательных процессов, антропологической идентичности и существованию человека, опосредованных личностными и психофизиологическими уязвимостями (чертами характера, психофизиологическими особенностями, когнитивными, поведенческими стилями, потенциально способствующими успешной реализации данных угроз). К таким рискам были отнесены информационное перенасыщение, девальвация возможностей памяти, снижение уровня критического мышления учащихся, формирование техногенной (цифровой) идентичности.

Коммуникативные риски. Такие риски связаны с нарушениями коммуникативных навыков участников образовательного процесса, т.е. навыков общения. В эту категорию попали риски возникновения зависимости от социальных сетей, экзистенциальные риски в цифровой среде, эскапизм подростков в цифровой среде, виртуальные деструктивные сообщества, суицидальные виртуальные сообщества («группы смерти») и т.п.

Социальные риски и аддикции. Этот набор рисков связан, в первую очередь, с взаимодействием участников образовательного процесса в социуме и может проявляться в виде социальной эксклюзии, цифрового тоталитаризма, кибер-троллинга, кибер-буллинга, смомби, интернет-игровых аддикций.

Информационные риски. Создание единой цифровой образовательной системы невозможно рассматривать без анализа информационных рисков, ведь их порождает сам факт осуществления

образовательного процесса в цифровой среде. К таким рискам относят риски нарушения конфиденциальности, целостности, доступности, аутентичности и неотказуемости.

Риски здоровью. Больше всего опасений у общественности и особенно родителей вызывают риски, связанные со здоровьем учащихся. Среди них авторы концепции выделяют ухудшение зрения, набор избыточного веса, нарушение сна, возникновение заболеваний дыхательных путей и аллергических реакций, нарушения в различных отделах позвоночника, перегрузка суставов кистей и др.

Однако является очевидным, что не все риски являются актуальными для каждого участника цифрового образования. Авторами было сделано предположение, что проявление тех или иных рисков у учащихся связано с их психологическими типами личностей.

Предлагаемая методика. Таким образом, авторами была поставлена научная задача установления этой взаимосвязи, которая была решена в рамках разработанной методики. Кратко методика представлена следующим образом:

1. Сбор гетерогенной группы испытуемых для соблюдения репрезентативности выборки.
2. Проведение психологической диагностики испытуемых с помощью методики 7 радикалов В.В. Пономаренко для идентификации двух наиболее проявляющихся радикалов в психотипе личности каждого из испытуемых.

3. На основе различных тестов проведение оценки начального и конечного уровня последствий от реализации рисков до и после дистанционного или электронного обучения. При этом проведение повторного тестирования рекомендовано проводить не раньше, чем через 9 месяцев. Полученные данные сохраняются в базе данных, которая в дальнейшем служит для формирования таблицы прецедентов.

4. Формирование таблицы прецедентов. Таблица прецедентов включает в себя обезличенные сведения об учащихся с указанием преобладающего и второго по частоте проявления радикала в их характерах (R_{1i} ; R_{2i}), где i – уникальный номер участника опросов. Для каждого из рисков ставится в соответствие N_i^j , где j – порядковый номер риска. Так как оценки даются в качественном виде, необходимо проведение формализации полученных оценок с помощью пятиуровневого нечеткого классификатора:

UR (Уровень последствий) = {Нулевой (0); Низкий (А); Средний (В); Выше среднего (С); Высокий (D)}

На основании количественных оценок начального и конечного уровней последствий от реализации рисков согласно была рассчитана разница между ними – ΔN_i^j . Информация может быть сведена в таблицу, фрагмент которой приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Фрагмент макета таблицы результатов участников эксперимента

ID	Наиболее ярко проявляющиеся радикалы		Уровень последствий от реализации риска до эксперимента			Уровень последствий от реализации риска после эксперимента			Δ		
	R_i^1	R_i^2	N_i^1	N_i^2	...	N_i^1	N_i^2	...	ΔN_i^1	ΔN_i^2	...
1	R_1^1	R_1^2	N_1^1	N_1^2	...	N_1^1	N_1^2	...	ΔN_1^1	ΔN_1^2	...
2	R_2^1	R_2^2	N_2^1	N_2^2	...	N_2^1	N_2^2	...	ΔN_2^1	ΔN_2^2	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
K	R_K^1	R_K^2	N_K^1	N_K^2	...	N_K^1	N_K^2	...	ΔN_K^1	ΔN_K^2	...

Если $\Delta N_i^j > \partial$ (коэффициент существенности роста уровня риска, определяемый ЛПР), значит, для i -го участника эксперимента цифровое обучение привело к росту N_i^j -го риска.

Для того чтобы иметь возможность интерпретировать данную таблицу как набор прецедентов, необходимо исключить дублирующие друг друга строки (обеспечить неизбыточность таблицы прецедентов).

Таким образом, получаются правила вида:

ЕСЛИ $R_{1i} = h1$ и $R_{2i} = h2$ ТО являются актуальными риски, для которых $\Delta N_i^j > \partial$.

В случае, когда левые части правил одинаковые, а правые отличаются, выполняется логическая операция «ИЛИ». Например, если имеются прецеденты:

ЕСЛИ $R_{1i} = 1$ и $R_{2i} = 2$ ТО являются актуальными риски N_i^7, N_i^4 .

ЕСЛИ $R_{1i} = 1$ и $R_{2i} = 2$ ТО являются актуальными риски N_i^3, N_i^6 .

То итоговым правилом после соответствующей обработки будет являться:

ЕСЛИ $R_{1i} = 1$ и $R_{2i} = 2$ ТО являются актуальными риски N_i^7 ИЛИ N_i^4 ИЛИ N_i^3 ИЛИ N_i^6 .

5. Выбор прецедента. Полученная на этапах 1–4 таблица прецедентов и основанная на ней База знаний в виде продукционных правил позволяют выстраивать индивидуальные образовательные траектории для снижения возможных негативных последствий для каждого участника ЦОП. Важно отметить, что риски, связанные с физическим состоянием участников ЦОП, не рассматриваются в рамках данной статьи, так как они не связаны с психологическими особенностями характера, а только с физиологическими особенностями организма. Информационные риски также не рассматриваются, так как они зависят от состояния информационной обучающей среды, а не от ее пользователей.

Составление таблицы прецедентов и базы правил для автоматизации предложенной методики. Для автоматизации процесса управления рисками при использовании цифровой образовательной среды авторами была проведена апробация методики на экспериментальной группе из 185 учащихся средних школ города Астрахань, которые обучались дистанционно в 2020 учебном году. Входное тестирование было проведено в марте 2020 года, а выходное – в январе 2021 года. В качестве метода оценки памяти были использованы упражнения на механическое запоминание цифр или изображений. Для выявления уровня критического мышления применен тест Уотсона – Глейзера, для установления суицидального риска – тест А.А. Кучера и В.П. Костюкевича. Таким образом, была получена таблица прецедентов, которая после соответствующей обработки (избавление от избыточности и непротиворечивости) стала выступать в качестве базы правил, которая включает в себя информацию о психологическом типе личности участника образовательного процесса, а также риски, распределенные на 3 категории: наиболее актуальные, среднеактуальные, наименее актуальные. Фрагмент этой базы приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Фрагмент базы правил

Превалирующий радикал	Второй по значимости	Наиболее актуальные риски $N_i^j > 0,5$	Среднеактуальные риски $0,5 > N_i^j \geq 0,2$	Наименее актуальные риски $N_i^j < 0$
истероидный	эпилептоидный	Информационное перенасыщение; снижение уровня критического мышления....	Влияние деструктивных сообществ, формирование техногенной идентичности...	Смомби, интернет-зависимость...
...	...	...	...	...
эмотивный	гипертимный	Зависимость от социальных сетей, интернет-игровые аддикции...	Смомби, суицидальные сообщества...	Социальная инклюзия, кибертроллинг...
...	...	...	...	...

Эта база правил легла в основу программного продукта для идентификации и управления рисками цифровой образовательной среды.

Описание структуры разработанного программного продукта. В рамках программного продукта осуществляют деятельность несколько стандартных пользователей:

- администратор системы. Администратор системы имеет полный контроль над системой: подтверждает регистрацию новых преподавателей и экспертов, редактирует аккаунты пользователей, удаляет пользователей;
- эксперт-психолог. Добавляет и удаляет риски, редактирует взаимосвязи между парами радикалов и рисками. Редактирует и добавляет вопросы теста на определение превалирующих радикалов;
- преподаватель. Добавляет, редактирует и удаляет страницы учащихся. Отвечает на вопросы анкеты по вербальным характеристикам учащихся. Получает список рисков по их актуальности по каждому учащемуся. Получает рекомендации по минимизации рисков по каждому учащемуся.

Диаграмма вариантов использования приведена на рисунке 1.

Пользователи – преподаватели и эксперты могут работать в системе только после подтверждения их учетных записей администратором системы.

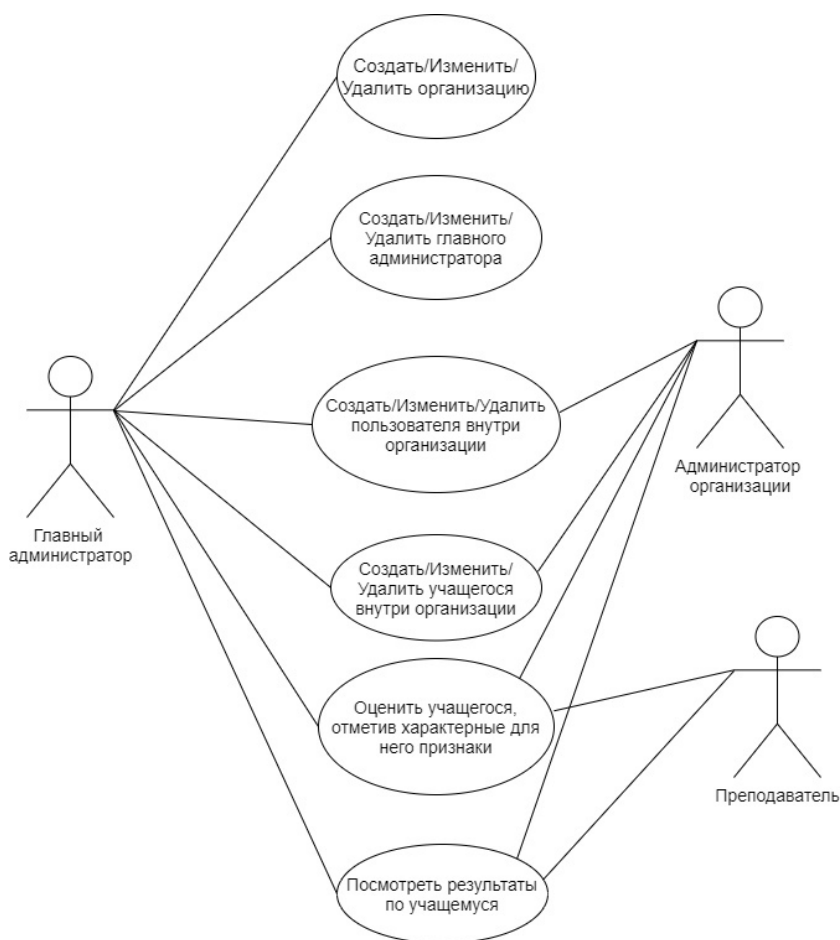


Рисунок 1 – Диаграмма вариантов использования предлагаемого программного продукта

Общий алгоритм работы программного продукта. Работу с программным продуктом преимущественно проводит преподаватель, которому необходимо оценить риски для каждого из учащихся своего класса или группы. Для этого преподаватель выбирает одного из учащихся своего класса (рис. 2) и заходит в его личный профиль путем нажатия соответствующей кнопки в интерфейсе программного продукта.

ИМЯ ^v^	ФАМИЛИЯ ^v^	
Иванов	Егор	  
Кропоткина	Надежда	  
Резник	Наталья	  
Давыдов	Михаил	  

Рисунок 2 – Перечень учащихся, закрепленных за преподавателем

В профиле учащегося преподаватель с помощью «галочек» отмечает вербальные и невербальные признаки, которые характерны для конкретного учащегося. Все признаки подразделяются на 4 группы: внешний вид, качества поведения, выполнение тех или иных задач, особенности коммуникации (рис. 3). Данные признаки и группы признаков определены в соответствии с методикой «7 радикалов» В.В. Пономаренко [6].

После нажатия кнопки «Сохранить» программа в автоматическом режиме строит психологический профиль учащегося на основе отмеченных признаков и выводит в личном профиле учащегося информацию о двух преобладающих радикалах (рис. 4).

Вербальные признаки

Отметьте признаки, которые характерны для студента **Иванов Егор**.

Яркая, контрастная внешность	☒
Театральность, манерность	☐
Непостоянство (в одежде, в поведении)	☐
Демонстративность	☒
Выраженное стремление быть оригинальным	☒
Атлетико-диспластическое телосложение	☐
Аккуратность, опрятность во всем	☒
Формализм в учебе, речи и т. д.	☐

Отмена Сохранить

Рисунок 3 – Интерфейс для анализа вербальных и невербальных признаков учащихся

Результаты

Главный радикал: Эпилептоидный

Второй по значимости: Тревожный

Рисунок 4 – Вывод результатов анализа психологического профиля учащегося

На основании полученной пары превалирующих радикалов и имеющейся базы правил преподаватель получает перечень возможных рисков, распределенных на три группы по уровню их актуальности – наиболее актуальные, среднеактуальные, наименее актуальные, а также описание каждого из рисков (на базе разработанного ранее атласа рисков информационно-коммуникативной среды), а также рекомендации по минимизации каждого из них [3].

Риски

Наиболее актуальные риски

- Цифровой тоталитаризм (социальный риск)
- Смомби (аддикции)
- Информационное перенасыщение (когнитивный риск)
- Девальвация возможностей памяти (когнитивный риск)
- Снижение уровня критического мышления учащихся (когнитивный риск)
- Кризисная трансформация сознания (когнитивный риск)

Среднеактуальные риски

- Социальная эксклюзия (социальный риск)
- Кибер-троллинг (социальный риск)
- Нормативный кризис (коммуникативный риск)
- Зависимость от социальных сетей (коммуникативный риск)

Рисунок 5 – Перечень возможных рисков

Таким образом, в общем виде алгоритм работы разработанного программного продукта можно представить следующим образом (рис. 6).

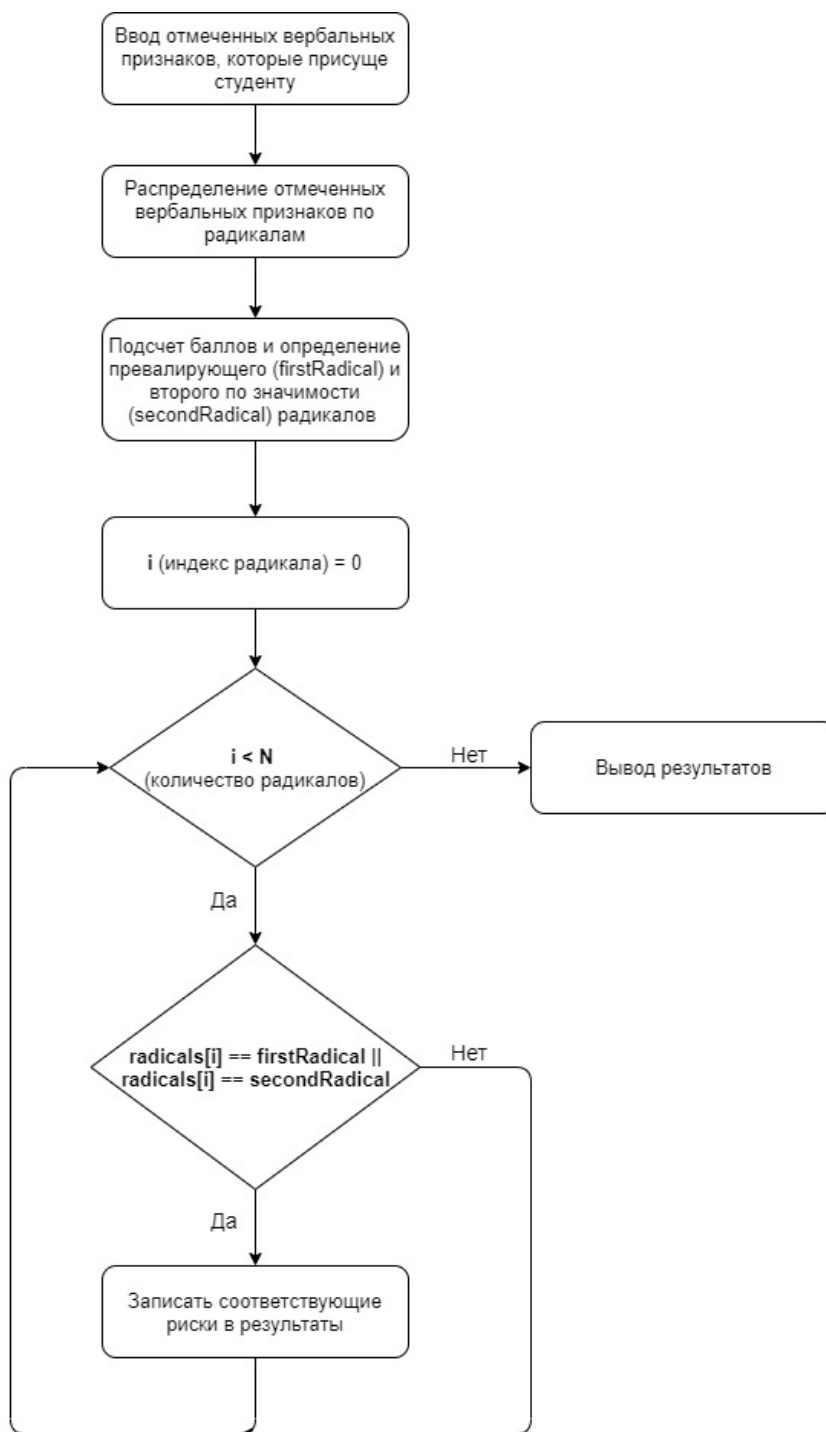


Рисунок 6 – Алгоритм работы программного продукта

Отдельно предлагается рассмотреть интерфейс эксперта в рамках программного продукта. Несмотря на то, что для корректного функционирования ПО разработчиками были собраны данные для формирования базы правил, функционал эксперта подразумевает возможность редактирования базы знаний путем добавления или удаления списка возможных рисков, а также взаимосвязь между набором радикалов и актуальными им рисками. Для этого пользователю нужно перейти в раздел «Радикалы и риски» и отредактировать их сопоставление.

Превалирующий радикал

Превалирующий радикал

Эпилептоидный

Второй по значимости радикал

Второй по значимости радикал

Истероидный

Наиболее актуальные риски

Социальная эксклюзия	☐
«Цифровой тоталитаризм»	☒
Кибер-троллинг	☐
Нормативный кризис	☒
Зависимость от социальных сетей	☒

Рисунок 7 – Редактирование сопоставления радикалов и рисков

Описание структуры разработанного приложения. Приложение имеет серверную часть, написанную на языке программирования javascript на программной платформе Node.js. Одно из основных преимуществ данной платформы – возможность использовать любую операционную систему для установки приложения. Фронтенд разработан на языке Typescript версии 4.0.7 с использованием фреймворка Angular версии 11.2.1. Схема взаимодействия компонентов разработанной системы представлена на рисунке 3.

Разработанное приложение использует нереляционную базу данных, преимущество использования которой заключается в том, что при доработке функционала системы изменения в структуре базы данных сводятся к минимуму и не затрагивают хранимые данные. Такой подход позволяет быстро обрабатывать результаты выборки. Модель данных приведена на рисунке 8.

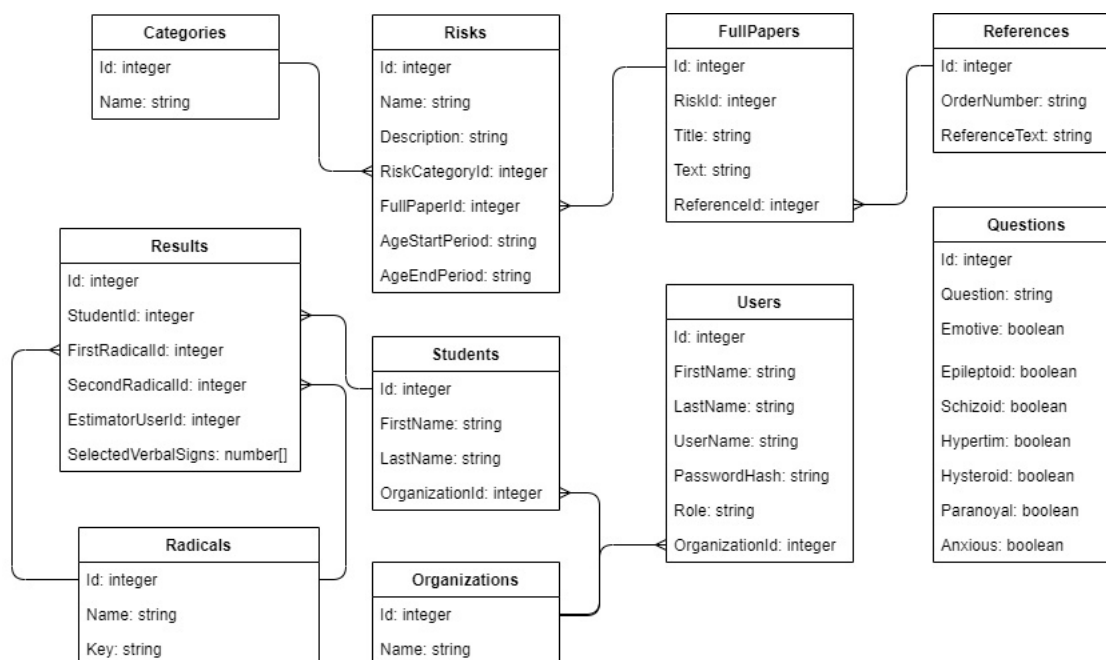


Рисунок 8 – Модель данных разработанного программного решения

Данные создаются и обновляются с помощью специальных запросов. Запросы могут извлекать из базы как информацию из одной таблицы, так и связанные сущности из разных таблиц.

Заключение. Программная реализация предложенной методики по управлению рисками при использовании цифровой образовательной среды предназначена для использования в образовательных учреждениях различного типа для оценки уровня последствий от реализации тех или иных видов рисков в зависимости от выявленного психологического типа личности обучающегося на основе прецедентного подхода. Бета-версия программного продукта в виде веб-приложения уже прошла предварительное тестирование в школе и вузах Астрахани, в рамках которого были выявлены и устранены незначительные ошибки интерфейса, что позволяет расширять зону использования программного продукта за пределы региона.

Библиографический список

1. Ажмухамедов, И. М. Анализ преимуществ и возможных последствий реализации единой цифровой образовательной среды / И. М. Ажмухамедов, В. Ю. Кузнецова // Перспективы и приоритеты педагогического образования в эпоху трансформаций, выбора и вызовов : сборник научных трудов VI Виртуального Международного форума по педагогическому образованию. – Казань, 2020. – С. 3–12.
2. Ажмухамедов, И. М. Оценка восприимчивости участника образовательного процесса к рискам цифрового обучения в зависимости от его психологического профиля / И. М. Ажмухамедов, В. Ю. Кузнецова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2021. – № 2 (54). – С. 24–30.
3. Баева, Л. В. Цифровой поворот в российском образовании: от проблем к возможностям / Л. В. Баева, С. А. Храпов, И. М. Ажмухамедов, А. В. Григорьев, В. Ю. Кузнецова // Ценности и смыслы. – 2020. – № 5 (69). – С. 28–44. – DOI: 10.24411/2071-6427-2020-10043.
4. Баева, Л. В. Атлас рисков в информационно-коммуникативной среде / Л. В. Баева, И. М. Ажмухамедов, С. А. Храпов, В. Ю. Кузнецова, А. В. Григорьев, А. В. Станишевская // Свидетельство о регистрации базы данных № 2020621456. – 17.08.2020. – Заявка № 2020621057 от 30.06.2020.
5. Кондратьев, В. Психологические типы учителей и учащихся / В. Кондратьев // Психологическая наука и образование. – 2003. – № 3 (52–57).
6. Пономаренко, В. В. Практическая характерология. Методика 7 радикалов / В. В. Пономаренко. – Москва : АСТ, 2019. – 224 с.
7. Самотовинский, Д. В. Риски цифровизации образования: нужны ли нам киберспортивные факультативы? / Д. В. Самотовинский, О. Н. Масленникова // Вестник Гуманитарного института. – 2020. – № 1. – С. 147–150. <https://isuct-bhi.ru/sites/default/files/issue/2020/1/bhi-2020-1-147.pdf>
8. Стрекалова, Н. Б. Риски внедрения цифровых технологий в образование / Н. Б. Стрекалова // Вестник Самарского университета. История, педагогика, филология. – 2019. – № 2. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/riski-vnedreniya-tsifrovyyh-tehnologiy-v-obrazovanie>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
9. Traxler, J. Learning in a mobile age / J. Traxler // International Journal of Mobile and Blended Learning. – 2009. – № 1 (1). – P. 1–12. – DOI: 10.4018/jmbl.2009010101.
10. Driver, P. Pervasive Games and Mobile Technologies for Embodied Language Learning / P. Driver // International Journal of Computer Assisted Language Learning and Teaching. – 2012. – Vol. 2, issue 4. – P. 23–37. – DOI: 10.4018/ijcallt.2012100104.

References

1. Azhmukhamedov, I. M., Kuznetsova, V. Yu. Analiz preimushchestv i vozmoznykh posledstviy realizatsii edinoi tsifrovoy obrazovatelnoy sredy [Analysis of the advantages and possible consequences of the implementation of a single digital educational environment]. *Perspektivy i prioritety pedagogicheskogo obrazovaniya v epokhu transformatsii, vybora i vyzovov : sbornik nauchnykh trudov VI Virtualnogo Mezhdunarodnogo foruma po pedagogicheskomu obrazovaniyu* [Prospects and priorities of pedagogical education in the era of transformations, choices and challenges : collection of scientific papers of the VI Virtual International Forum on teacher education]. Kazan, 2020, pp. 3–12.
2. Azhmukhamedov, I. M., Kuznetsova, V. Yu. Otsenka vospriimchivosti uchastnika obrazovatel'nogo protsessa k riskam tsifrovogo obucheniya v zavisimosti ot ego psikhologicheskogo profilya [Assessment of the susceptibility of a participant in the educational process to the risks of digital learning depending on his psychological profile]. *Pri-kaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2021, no. 2 (54), pp. 24–30.
3. Baeva, L. V., Khrapov, S. A., Azhmukhamedov, I. M., Grigoriev, A. V., Kuznetsova, V. Yu. Tsifrovoy povorot v rossiyskom obrazovanii: ot problem k vozmozhnostyam [Digital turn in Russian education: from problems to opportunities]. *Tsennosti i smysly* [Values and meanings], 2020, no. 5 (69), pp. 28–44. DOI: 10.24411/2071-6427-2020-10043.
4. Baeva, L. V., Azhmukhamedov, I. M., Khrapov, S. A., Kuznetsova, V. Yu., Grigoriev, A. V., Stanishevskaya, A. V. Atlas riskov v informatsionno-kommunikativnoy srede [Atlas of risks in the information and communication environment]. *Svidetelstvo o registratsii bazy dannykh* [Certificate of registration of the database], no. 2020621456, 17.08.2020. Application no. 2020621057 dated 06.30.2020.

5. Kondratyev, V. Psihologicheskie tipy uchiteley i uchashchikhsya [Psychological types of teachers and students]. *Psihologicheskaya nauka i obrazovanie* [Psychological Science and Education], 2003, no. 3 (52–57).
6. Ponomarenko, V. V. *Prakticheskaya kharakterologiya. Metodika 7 radikalov* [Practical characterology. 7 radicals technique]. Moscow, AST, 2019. 224 p.
7. Samotovinsky, D. V., Maslennikova, O. N. Riski tsifrovizatsii obrazovaniya: nuzhny li nam kibersportivnye fakultativy? [Risks of digitalization of education: do we need cyber-sports electives?]. *Vestnik Gumanitarnogo instituta* [Bulletin of the Humanitarian Institute], 2020, no. 1, pp. 147–150. <https://isuct-bhi.ru/sites/default/files/issue/2020/1/bhi-2020-1-147.pdf>
8. Strekalova, N. B. Riski vnedreniya tsifrovyykh tekhnologiy v obrazovanie [Risks of introducing digital technologies into education]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Istoriya, pedagogika, filologiya* [Bulletin of Samara University. History, pedagogy, philology], 2019, no. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/riski-vnedreniya-tsifrovyyh-tehnologiy-v-obrazovanie>
9. Traxler, J. Learning in a mobile age. *International Journal of Mobile and Blended Learning*, 2009, no. 1 (1), pp. 1–12. DOI: 10.4018 / jmbl.2009010101.
10. Driver, P. Pervasive Games and Mobile Technologies for Embodied Language Learning. *International Journal of Computer Assisted Language Learning and Teaching*, 2012, vol. 2, issue 4, pp. 23–37. DOI: 10.4018/ijcallt.2012100104.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

DOI 10.21672/2074-1707.2021.55.3.082-089
УДК 519.711.3, 556.3

МЕТОДЫ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Статья поступила в редакцию 09.06.2021, в окончательном варианте – 21.07.2021.

Калиберда Игорь Владимирович, Северо-Кавказский федеральный университет, Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ в г. Пятигорске, 357500, Российская Федерация, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, 56,
заведующий лабораторией, e-mail: kaliberda.igor@ya.ru

Рассматривается важная задача выбора метода синтеза регуляторов для построения системы управления параметрами гидrolитосферных процессов. В статье рассмотрены вопросы системного анализа и синтеза систем управления с распределенными параметрами. Показаны существующие на сегодняшний день пути решения математических уравнений, описывающие модели с пространственными координатами. Выделены основные методы, когда существует решения математической модели: аналитическое конструирование оптимальных регуляторов и структурный метод анализа. Описаны методы аппроксимации в случаях, когда не существует решения математической модели: методы конечномерной аппроксимации; декомпозиции билинейных систем управления; частотный метод. Приведены основные положения методов при решении задачи дискретизации в частных производных. Показано предпочтение частотного метода синтеза регуляторов в создании систем управления гидrolитосферных процессов. Получен годограф в виде логарифмических амплитудной и фазовой частотных поверхностей, который можно использовать интерпретации критерия устойчивости Найквиста по графикам. Рассмотрен частотный метод синтеза многомерных систем, когда входные воздействия в распределенный регулятор реализуются в виде дискретной функции по пространству. Показано условие, при котором объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных. Сделан вывод, что частотный метод синтеза регуляторов представляется наиболее удобным инструментом при создании гидродинамических систем с распределенными параметрами.

Ключевые слова: метод синтеза регуляторов, система управления с распределенными параметрами, гидrolитосферные процессы

METHODS OF SYNTHESIS OF REGULATORS FOR HYDRODYNAMIC CONTROL SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

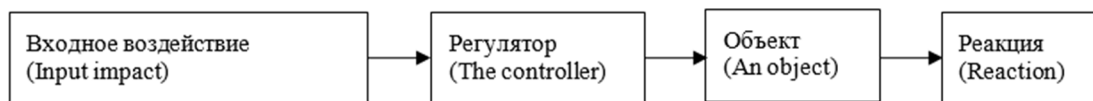
The article was received by the editorial board on 09.06.2021, in the final version – 21.07.2021.

Kaliberda Igor V., North Caucasus Federal University, Institute of Service, Tourism and Design (branch) of NCFU in Pyatigorsk, 56 40 let Oktyabrya Ave., Pyatigorsk, 357500, Russian Federation,
Head of the laboratory, e-mail: kaliberda.igor@ya.ru.

An important problem of choosing a method for synthesizing regulators for constructing a system for controlling the parameters of hydrolithospheric processes is considered. The article deals with the issues of system analysis and synthesis of control systems with distributed parameters. The existing ways of solving mathematical equations describing models with spatial coordinates are shown. The main methods when there are solutions to the mathematical model are identified: analytical construction of optimal regulators and the structural method of analysis. Methods of approximation in cases where there is no solution to the mathematical model are described: methods of finite-dimensional approximation; decomposition of bilinear control systems; frequency method. The main provisions of the methods for solving the problem of discretization in partial derivatives are given. The preference of the frequency method of regulator synthesis in the creation of control systems for hydrolithospheric processes is shown. A hodo-graph is obtained in the form of logarithmic amplitude and phase frequency surfaces, which can be used to interpret the Nyquist stability criterion from graphs. A frequency method for the synthesis of multidimensional systems is considered, when the input effects to a distributed controller are implemented as a discrete function in space. The condition under which the object belongs to the class of spatially invariant objects is shown. It is concluded that the frequency method of regulator synthesis is the most convenient tool for creating systems with distributed parameters.

Keywords: method of regulator synthesis, control system with distributed parameters, hydrolithospheric processes

Графическая аннотация (Graphical annotation)



Введение. Процессы, происходящие в реальной среде, содержат как временную составляющую, так и координаты трехмерного пространства. Математические уравнения, описывающие модели рассматриваемых изменений, выражаются, как правило, с использованием частных производных. Системный анализ таких изменений в связи с этим сильно усложняется.

Обзор методов. Можно пойти по пути исследования распределенных процессов, предположив, что существует аналитическое решение математической задачи. Тогда решение будет содержать бесконечный спектр собственных вектор-функций, а практическая реализация таких изменений в системе с распределенными параметрами (СРП) потребует использования методов дискретизации. Для СРП данное направление получило развитие в таких методах, как:

- АКОР – аналитическое конструирование оптимальных регуляторов;
- СМА – структурный метод анализа.

АКОР, базирующееся на принципах оптимальности Беллмана и максимума Понтрягина, является понятийным аппаратом направления под руководством В.А. Ковалева. Метод АКОВ для СРП подробно освещен в работах таких авторов, как Э.Я. Рапопорт [6], И.П. Ультринов, В.П. Хацкевич [7] и др. В частном случае, для гидродинамических процессов, решение задачи синтеза представлено в работах В.А. Олейникова и Е.Г. Павлова. Необходимо отметить, что данному методу присущи некоторые проблемы, связанные с оптимальным управлением. Это вызвано рядом трудностей решения уравнений Риккати. Если решение дифференциального уравнения (ДУ) получено, то не понятно, как аппроксимировать бесконечную систему уравнений. Также сложно выбрать весовые коэффициенты функций оптимизации и пронаблюдать изменения.

СМА СРП описывает направление работ А.Г. Бутковского, Л.М. Пустыльников и Ю.В. Дарнинского [8], раскрывающее теорию подвижного управления.

В случае, когда не существует решения математической модели, применяются методы аппроксимации, которые описывают действие объекта по выбранным пространственным модам. По сути предлагается дискретный аналог математической модели, который в свою очередь обладает численным решением. Наиболее известные методы данного направления:

- МКА – методы конечномерной аппроксимации;
- ДБСУ – декомпозиции билинейных систем управления;
- ЧМ – частотный метод.

МКА в литературе подробно рассмотрены, например, такими авторами, как К.Г. Валеев и О.А. Жаутыков. В частности, для бесконечных систем ДУ даны теоремы существования решений и, причем их единственности.

Развивая теорию управления и идентификации относительно билинейных динамических систем, Ю. И. Самойленко [9] разработал теоретико-групповые методы оптимизации и ДБСУ. Информационная энтропия протонной подсистемы была рассмотрена как носитель дискретной информации в описываемых молекулярных сенсорах и вычислительных устройствах, что и стало основой метода управления расположением протонов в водородных связях.

ЧМ разработан И.М. Першиным и подробно изложен в работах [1–4]. ЧМ используется в СРП, когда для получения динамических характеристик объектов при выбранном числе пространственных мод определяются на основе экспериментальных данных. ЧМ СРП включает следующие составные части:

1. Методика анализа.
2. Определение частотных критериев устойчивости.
3. Аппроксимация характеристик объектов с учетом набора сосредоточенных звеньев.
4. Формирование структуры регулятора.
5. Методика синтеза для СРП.

Особое внимание уделяется переходу от бесконечно мерного фазового пространства к конечномерному. Если на данном этапе не учесть существенных свойств распределенного объекта, то в итоге возможно получить описание совсем другого процесса.

Предлагаемый метод. Рассмотрим математическую модель месторождения минеральных вод, состоящую из четырех добывающих и контролирующих скважин и четырех водоносных пластов. Схема расположения скважин представлена на рисунке 1. Процесс взаимосвязей между пластами может быть записан в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial h_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= k_{1,x} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial z_1^2}; \\ \frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{\eta_2} \left(k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z_2^2} \right); \\ \frac{\partial H_3(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{\eta_3} \left(k_{3,x} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{3,y} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{3,z} \frac{\partial^2 H_3(x, y, z, \tau)}{\partial z_3^2} \right); \\ \frac{\partial H_4(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{\eta_4} \left(k_{4,x} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{4,y} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{4,z} \frac{\partial^2 H_4(x, y, z, \tau)}{\partial z_4^2} \right) - \\ &+ V \cdot \delta(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j}) \\ 0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_{z_4} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где h – напор в горизонте грунтовых вод;

H_i – напор в изучаемом i -м водоносном горизонте ($i = 2 \dots 4$);

$k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$ – коэффициенты фильтрации по пространственным координатам в горизонте грунтовых вод ($i = 1$) и i -го пласта ($i = 2 \dots 4$);

η_i – упругость i -го пласта ($i = 2 \dots 4$);

$V = Q \cdot K_\phi$ – понижение напора, вызванное воздействием добывающей скважины (Q – дебит добывающей скважины, K_ϕ – заданный коэффициент);

$\delta(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j})$ – функция, равная единице, если $x = x_{0,j}, y = y_{0,j}, z_{0,j} \leq z_1$, и равная нулю в других случаях;

x, y, z – пространственные координаты;

τ – время.

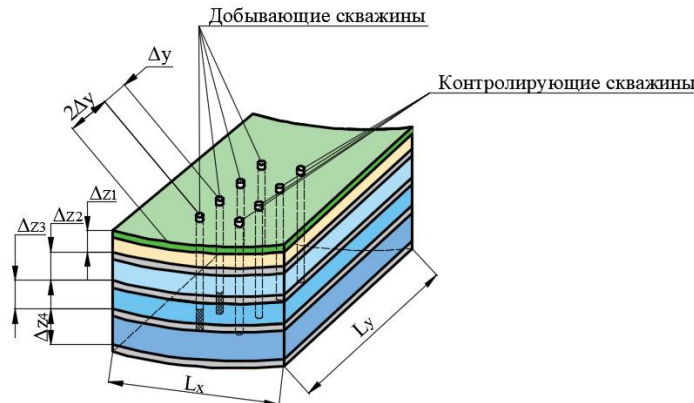


Рисунок 1 – Схема месторождения

Граничные условия горизонта грунтовых вод и вторым пластом записываются в следующем виде:

$$h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) = h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) + b_1 \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)), \quad (2)$$

$$H_2(x, y, 0, \tau) = H_2(x, y, 0, \tau) - b_1 \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)). \quad (3)$$

Граничные условия между вторым и третьим пластом записываются в следующем виде:

$$H_2(x, y, L_{z_3}, \tau) = H_2(x, y, L_{z_3}, \tau) + b_2 \cdot (H_3(x, y, 0, \tau) - H_2(x, y, L_{z_3}, \tau)), \quad (4)$$

$$H_3(x, y, L_{z_3}, \tau) = H_3(x, y, L_{z_3}, \tau) + b_2 \cdot (H_3(x, y, 0, \tau) - H_2(x, y, L_{z_3}, \tau)). \quad (5)$$

Граничные условия между третьим и четвертым пластами записываются в следующем виде:

$$H_3(x, y, L_{z_3}, \tau) = H_3(x, y, L_{z_3}, \tau) + b_3 \cdot (H_4(x, y, 0, \tau) - H_3(x, y, L_{z_3}, \tau)), \quad (6)$$

$$H_4(x, y, L_{z_3}, \tau) = H_4(x, y, L_{z_3}, \tau) + b_3 \cdot (H_4(x, y, 0, \tau) - H_3(x, y, L_{z_3}, \tau)). \quad (7)$$

Для нижней границы четвертого пласта условие будет иметь вид:

$$\partial H_4(x, y, L_{z_4}, \tau) / \partial z = 0. \quad (8)$$

Граничные условия по бокам моделируемой области будут иметь вид:

$$h_1(0, y, z, \tau) = h_{1,0}; H_2(0, y, z, \tau) = H_{2,0}, \\ H_3(0, y, z, \tau) = H_{3,0}; H_4(0, y, z, \tau) = H_{4,0}, \quad (9)$$

$$\partial h_1(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0; \partial H_2(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0, \\ \partial H_3(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0; \partial H_4(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0, \quad (10)$$

где $h_{1,0}, H_{2,0}, H_{3,0}, H_{4,0}$ – начальные состояния грунтовых вод пластов.

Для определения динамических характеристик необходима дискретная модель объекта. Для грунтовых вод модель будет иметь вид:

$$\frac{\Delta h_{1,\eta,\gamma,\xi}}{\Delta \tau} = k_{1,x} \frac{h_{1,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta x)^2} + \\ + k_{1,y} \frac{h_{1,\eta,\gamma-1,\xi} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta,\gamma+1,\xi}}{(\Delta y)^2} + \\ + k_{1,z} \frac{h_{1,\eta,\gamma,\xi-1} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta,\gamma,\xi+1}}{(\Delta z)^2}, \quad (11)$$

$$2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1; 2 < \xi < N_{z1} - 1,$$

где N_x, N_y – число точек дискретизации по координатам x и y соответственно; N_{zi} – число точек дискретизации i -го пласта по координате z ($i=1...4$); η, γ, ξ – пространственные координаты.

Для пластов со второго по четвертый модель будет иметь аналогичный вид.

Входным воздействием на объект управления служит дебит добывающей скважины $Q(\tau)$.

В работах [1–3] достаточно подробно описаны передаточные функции (ПФ) распределенных звеньев. Реакция объекта по выбранной моде (η, γ) входного воздействия будет представлена в виде:

$$W_{0,\eta,\gamma}(s) = \frac{\exp(\beta_{\eta,\gamma} \cdot z) + \exp(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot z)}{\lambda \cdot \beta_{\eta,\gamma} \cdot (\exp(\beta_{\eta,\gamma} \cdot z_L) - \exp(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot z_L))}, \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}), \quad (12)$$

где

$$\beta_{\eta,\gamma} = \left(\frac{s}{a} + \psi_{\eta}^2 + \tilde{\varphi}_{\gamma}^2 \right)^{1/2};$$

s – оператор Лапласа;

a, z, z_L – заданные числа;

$\psi_{\eta}, \tilde{\varphi}_{\gamma}$ – пространственные частоты; $(\eta, \gamma = \overline{1, \infty})$.

Теперь объект с СРП можно описать в виде ПФ полученного образца (1), а каждая ПФ – отношением бесконечных полиномов.

Представим в (12) $s = j\omega$ и получим комплексный передаточный коэффициент (КПК) СРП по пространственным модам:

$$W_{0,\eta,\gamma}(j\omega) = \frac{\exp\left(\beta_{\eta,\gamma} \cdot z^*\right) + \exp\left(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot z^*\right)}{\lambda \cdot \beta_{\eta,\gamma} \cdot (\exp(\beta_{\eta,\gamma} \cdot z_L) - \exp(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot z_L))}, \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}) \quad (13)$$

где

$$\beta_{\eta,\gamma} = \left(\frac{j\omega}{a} + \psi_{\eta}^2 + \tilde{\phi}_{\gamma}^2 \right)^{1/2};$$

СРП, у которой КПК можно описать выражением, относится к классу пространственно-инвариантных. Из этого следует, что решение при квазистационарном воздействии распадается по собственным вектор-функциям оператора объекта. Данные вектор-функции можно представить в виде комбинации $\sin(\cdot)$ и $\cos(\cdot)$. Теперь данный объект можно представить в виде совокупности независимых блоков с комплексными передаточными коэффициентами вида (2). Отсюда следует, что пространственная мода, при прохождении через объект управления, изменяет только амплитуду.

Если изменять в (13) ω от 0 до ∞ , то получим бесконечный спектр частотных характеристик СРП, представленный на рисунке 1а.

Введем дискретную функцию (ДФ) $G_{\eta,\gamma}$ и обозначим ее через выражение:

$$G_{\eta,\gamma} = \psi_{\eta}^2 + \tilde{\phi}_{\gamma}^2, \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}) \quad (14)$$

Данная функция изменяется в пределах $G_H = G_{1,1} \leq G_{\eta,\gamma} \leq \infty$. При переходе от ДФ $G_{\eta,\gamma}$ к непрерывной G , охватывающей весь спектр дискретных значений ДФ $G_{\eta,\gamma}$, выражение (12) примет вид:

$$W_0(G, s) = \frac{\exp\left(\beta_{\eta,\gamma} \cdot z^*\right) + \exp\left(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot z^*\right)}{\lambda \cdot \beta_{\eta,\gamma} \cdot (\exp(\beta_{\eta,\gamma} \cdot z_L) - \exp(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot z_L))}, \quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}), \quad (15)$$

где $\beta_{\eta,\gamma} = \left(\frac{s}{a} + G \right)^{1/2}$, $G_H \leq G \leq \infty$.

В случаях гидродинамических систем, когда возможно оценить динамику процесса, передаточную функцию можно аппроксимировать функцией следующего вида:

$$W(s, G) = K \cdot e^{-\beta \cdot \Delta z}, \quad G_H \leq G \leq \infty, \quad (16)$$

где K , Δz – параметры гидролитосферного объекта.

Изменяя в (15) ω от 0 до ∞ , а $G_H \leq G \leq \infty$, получим пространственных годограф, включающий весь спектр частотных характеристик по пространственным модам (рис. 1б).

Полученный годограф в виде логарифмических амплитудной и фазовой частотных поверхностей можно использовать интерпретации критерия устойчивости Найквиста по графикам. Положим, что характеристические полиномы рассматриваемой СРП по каждой пространственной моде не имеют полюсов, лежащих в правой полуплоскости. Тогда, критерием устойчивости замкнутой системы будет условие не пересечения линии среза модуля на совмещенной плоскости Γ_2 и Γ_4 с областью A , как показано на рисунке 2в. На рисунке 2а представлена амплитудная частотная поверхность, на рисунке 2г – фазовая поверхность.

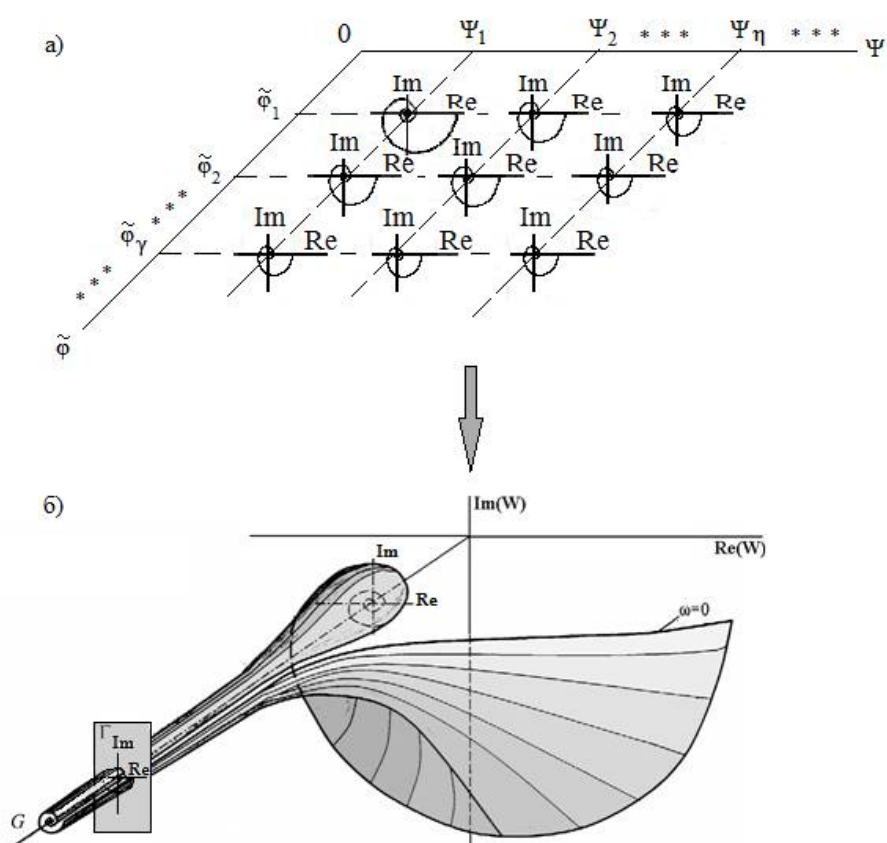


Рисунок 1 – Пространственный годограф

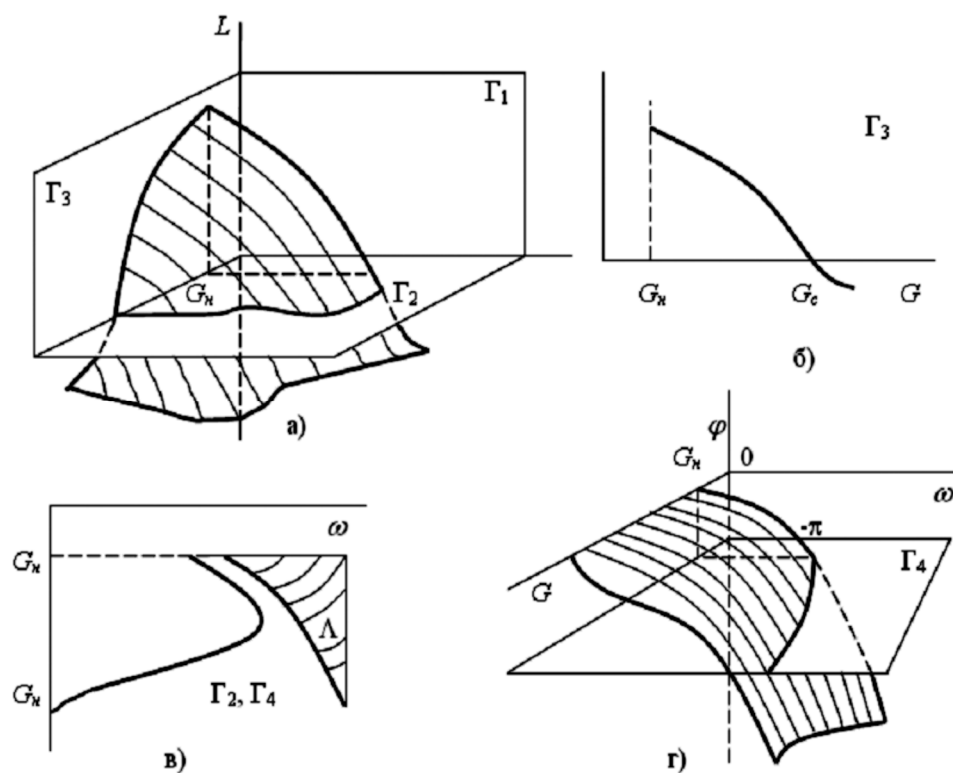


Рисунок 2 – Частотные поверхности

Рассмотрим частотный метод синтеза многомерных систем. Входные воздействия в распределенный регулятор реализуются в виде дискретной функции по пространству. Значения функции выхода распределенного объекта измеряются в конечном числе точек [12]. Матрица комплексных передаточных коэффициентов объекта, связывающая ξ -й вход с m -м выходом записывается в виде [1, 2]:

$$W_{0,\eta,\gamma}(j\omega) = [W_{m,\xi}], (m, \xi = \overline{1, n}). \quad (17)$$

Представим входное воздействие на объект в виде ряда:

$$\alpha_\gamma(\tau) = \sum_{\eta=1}^n C_\eta(\tau) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \eta \cdot y_\gamma}{L}\right); L = \Delta y \times (n+1); y_\gamma = \Delta y \times \gamma, (\gamma = \overline{1, n}); \quad (18)$$

где Δy – заданное положительное число;

y_γ – точки дискретизации ($\gamma = \overline{1, n}$).

Полагая в (17) $C_\eta(\tau) = \exp(j\omega\tau)$, где ω – круговая частота, определим реакцию объекта на каждую пространственную моду:

$$T_{\eta,\gamma}(j\omega\tau) = \exp(j\omega\tau) \cdot \sum_{\xi=1}^n W_{\gamma,\xi} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \eta \cdot \xi}{n+1}\right), (\eta, \gamma = \overline{1, n}). \quad (19)$$

Запишем комплексный передаточный коэффициент по каждой пространственной моде:

$$W_\eta(y_\gamma, j\omega) = \frac{T_{\eta,\gamma}}{\exp(j\omega\tau) \cdot \sin(\pi \cdot \eta \cdot \gamma) / (n+1)}, \quad (20)$$

Объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных, если (9) записывается в виде:

$$W_\eta(y_\gamma, j\omega) = W_\eta(j\omega), (\gamma = \overline{1, n}) \quad (21)$$

Подставляя (20) в (21) и преобразуя, получим дискретный аналог условия пространственной инвариантности объекта [1, 2]:

$$\sum_{\xi=1}^n W_{\gamma,\xi} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \eta \cdot \xi}{n+1}\right) = W_\eta \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \eta \cdot \gamma}{n+1}\right). \quad (22)$$

Запишем уравнение (22) в виде:

$$W \cdot \chi = W_\eta \cdot \chi_\eta; \chi_\eta = [\chi_{\eta,\xi}]; \chi_{\eta,\xi} = \sin(\pi \cdot \eta \cdot \xi / (n+1)); \quad (\xi = \overline{1, n}); (\gamma = \overline{1, n}). \quad (23)$$

Из соотношения (23) следует [1]: объект (17) принадлежит к классу пространственно-инвариантных, если χ_η , ($\eta = \overline{1, n}$) являются собственными векторами матрицы W .

Заключение. Таким образом, ЧМ синтеза регуляторов представляется наиболее удобным инструментом при создании СРП, систем управления рассматриваемым процессом. В отличие от сосредоточенных систем частотный метод анализа и синтеза распределенных систем оперирует бесконечным набором пространственных мод (собственных вектор-функций оператора объекта) [10]. Состояние каждой пространственной моды описывается в бесконечном фазовом пространстве. Показано, что частотные характеристики распределенных объектов могут быть представлены бесконечной совокупностью частотных характеристик по пространственным модам. Поскольку рассматриваемые моды обладают свойствами ортогональности, то использование обобщенной координаты позволило перейти к амплитудным и фазовым частотным поверхностям. С помощью рассматриваемых частотных поверхностей возможно получить графическую интерпретацию критерия устойчивости Найквиста для выделенного класса систем с распределёнными параметрами. В современных работах авторов [4–5] разработаны специальные наборы звеньев и блоков, используемых в процедуре синтеза СРП управления.

Библиографический список

1. Першин, И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами / И. М. Першин. – Пятигорск : ИА КМВ. 2007. – 243 с.
2. Малков, А. В. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез / А. В. Малков, И. М. Першин. – Москва : Научный мир, 2012. – 476 с.
3. Першин, И. М. Синтез систем с распределенными параметрами: проблемы и перспективы / И. М. Першин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 2–10.
4. Першин, И. М. Частотная концепция анализа и синтеза систем с распределенными параметрами : монография / И. М. Першин. – Пятигорск : ПФ СКФУ, 2021. – 172 с.

5. Чернышев, А. Б. Устойчивость распределенных систем с дискретными управляющими воздействиями / А. Б. Чернышев, Ю. В. Ильюшин // Известия Южного федерального университета. – 2010. – № 12. – С. 166–171.
6. Рапопорт, Э. Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами : учебное пособие / Э. Я. Рапопорт. – Москва : Высшая школа, 2009. – 677 с.
7. Хацкевич, В. П. О решении задачи аналитического конструирования регуляторов для распределенных систем / В. П. Хацкевич // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 3. – С. 5–14.
8. Бутковский, А. Г. Управление распределенными системами путем перемещения источника / А. Г. Бутковский, Ю. В. Дарнинский, Л. М. Пустыльников // Автоматика и телемеханика. – 1974. – № 5. – С. 11–30.
9. Бутковский, А. Г. Управление квантово-механическими процессами / А. Г. Бутковский, Ю. И. Самойленко. – Москва : Наука, 1984. – 256 с.
10. Техногенные процессы в гидrolитосфере : идентификация, диагностика, прогноз, управление : Национальный научный форум «Нарзан-2011», 25–28 сентября 2011 года. – Кисловодск, 2011. – ISBN 978-5-89314-375-1.
11. Дровосекова, Т. И. Разработка математических моделей и синтез системы управления гидrolитосферными процессами Пятигорского месторождения минеральных вод : дис. ... канд. техн. наук / Т. И. Дровосекова. – Пятигорск : Северо-Кавказский федеральный университет, 2015.
12. Григорьев, В. В. Синтез распределенных регуляторов / В. В. Григорьев, С. В. Быстров, И. М. Першин. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2011. – 202 с.

References

1. Pershin, I. M. *Analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami* [Analysis and synthesis of systems with distributed parameters]. Pyatigorsk, RIA KMV, 2007. 243 p.
2. Malkov, A. V., Pershin, I. M. *Sistemy s raspredelennymi parametrami. Analiz i sintez* [Systems with distributed parameters. Analysis and synthesis]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2012. 476 p.
3. Pershin, I. M. *Sintez sistem s raspredelennymi parametrami: problemy i perspektivy* [Synthesis of systems with distributed parameters: problems and prospects]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Management], 2005, no. 6, pp. 2–10.
4. Pershin, I. M. *Frequency concept of analysis and synthesis of systems with distributed parameters : monograph* [Chastotnaya konceptsiya analiza i sinteza sistem s raspredelennymi parametrami : monografiya]. Pyatigorsk, PF SKFU, 2021. 172 p.
5. Chernyshev, A. B., Ilyushin, Yu. V. *Ustoychivost raspredelennykh sistem s diskretnymi upravlyayushchimi vozdeystviyami* [Stability of distributed systems with discrete control actions]. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta* [News of the South Federal University], 2010, no. 12, pp. 166–171.
6. Rapoport, E. Ya. *Optimalnoe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami : uchebnoe posobie* [Optimal control of systems with distributed parameters]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009. 677 p.
7. Hachevich, V. P. *O reshenii zadachi analiticheskogo konstruirovaniya regulyatorov dlya raspredelennykh sistem* [On solving the problem of analytical design of regulators for distributed systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 1972, no. 3, pp. 5–14.
8. Butkovskiy, A. G., Darninskiy Yu. V., Pustynnikov L. M. *Upravlenie raspredelennymi sistemami putem peremeshcheniya istochnika* [Managing distributed systems by moving the source]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 1974, no. 5, pp. 11–30.
9. Butkovskiy, A. G., Samoylenko, Yu. I. *Upravlenie kvantovo-mekhanicheskimi protsessami* [Control of quantum mechanical processes]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 256 p.
10. *Tekhnogennye processy v gidrolitosfere : identifikatsiya, diagnostika, prognoz, upravlenie : nacionalnyy nauchnyy forum «Narzan-2011», 25–28 sentyabrya 2011 goda* [Technogenic processes in the hydrolithosphere: identification, diagnostics, forecast, management : National Scientific Forum "Narzan-2011", September 25–28, 2011]. Kislovodsk, 2011. ISBN 978-5-89314-375-1.
11. Drovosekova, T. I. *Razrabotka matematicheskikh modeley i sintez sistemy upravleniya gidrolitosfernymi protsessami Pyatigorskogo mestorozhdeniya mineralnykh vod. : dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of mathematical models and synthesis of a control system for hydrolithospheric processes of the Pyatigorsk mineral water deposit : dis. ... cand. tech. sciences. Pyatigorsk, North Caucasus Federal University, 2015.
12. Grigorev, V. V., Bystrov, S. V., Pershin, I. M. *Sintez raspredelennykh regulyatorov*. Saint Peterburg, SPbGU ITMO, 2011. 202 p.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН,
КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

DOI 10.21672/2074-1707.2021.55.3.090-097
УДК 004.057.4; 004.057.7

**АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОТОКОЛОВ
РЕАКТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В VANET НА БАЗЕ NS3**

Статья поступила в редакцию 21.04.2021, в окончательном варианте – 27.06.2021.

Амани Ахмад Саббаг, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В. И. Ленина, 28, аспирант, ORCID: 0000-0002-1558-9204, e-mail: amanisabbagh86@gmail.com

Шчербаков Максим Владимирович, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В. И. Ленина, 28, доктор технических наук, профессор, ORCID: 0000-0001-7173-4499, e-mail: maxim.shcherbakov@gmail.com

Внимание к важности улучшения интеллектуальной транспортной системы (ИТС) всегда соответствует современным тенденциям использования новых технологий беспроводной связи, поэтому тенденция последних тем исследований сосредоточена на автомобильной специальной сети (VANET). Сети VANET играют жизненно важную роль в ИТС благодаря их растущему значению для построения ИТС. VANET – это подкласс мобильных одноранговых сетей (MANET). VANET зависит от беспроводных технологий для установления связи между движущимися транспортными средствами (узлами). Соответствующий и эффективный протокол маршрутизации помогает успешно обмениваться данными между мобильными узлами в автомобильных одноранговых сетях. VANET имеет множество функций, аналогичных MANET, таких как ограниченная полоса пропускания, самоорганизация, самоуправление и нестабильная топология сети. Сверх того, он имеет некоторые важные характеристики, такие как очень высокая мобильность узлов, ограничения задержек и частых сбоев в сети связи. По этой причине маршрутизация в сетях VANET намного сложнее, чем маршрутизация в сетях MANET. Цель настоящего исследования – оценка производительности протоколов AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) и DSR (Dynamic Source Routing) и их влияния на производительность сетей VANET. Актуальность данной статьи состоит в том, что в ней на большом количестве узлов и различных скоростей транспортных средств анализируется влияние размера сети на такие показатели производительности сети, как коэффициент доставки пакетов, пропускная способность, средняя задержка, накладные расходы и коэффициент потери пакетов. Оценивается уровень производительности сети для движения транспортных средств по улице при реалистичных сценариях мобильности, созданных с помощью инструмента Bonnmotion. Также проводится моделирование в симуляторе NS-3 для создания топологии сети VANET и протоколов маршрутизации.

Ключевые слова: протоколы реактивной маршрутизации, VANET, NS-3, Bonnmotion, производительность сети

**ANALYSIS OF THE PERFORMANCE
OF REACTIVE ROUTING PROTOCOLS IN VANET BASED ON NS3**

The article was received by the editorial board on 21.042021, in the final version – 27.06.2021.

Amani Ahmad Sabbagh, Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation, post-graduate student, ORCID: 0000-0002-1558-9204, e-mail: amanisabbagh86@gmail.com

Shcherbakov Maxim V., Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

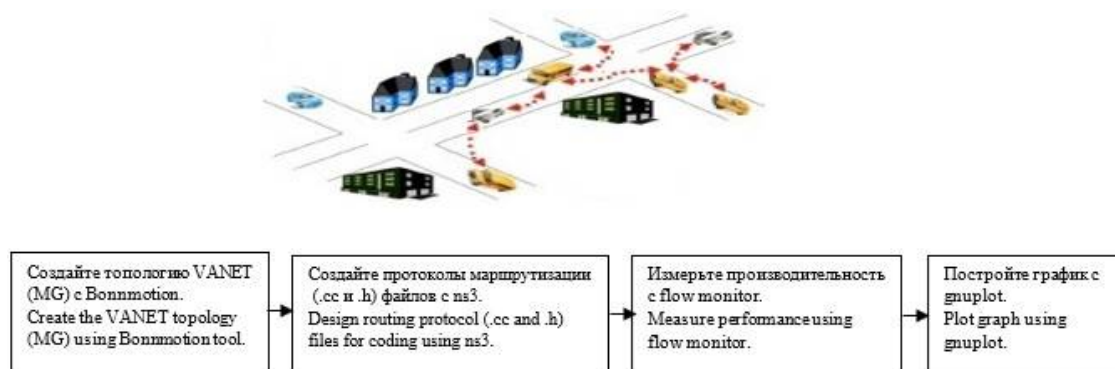
Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0001-7173-4499, e-mail: maxim.shcherbakov@gmail.com

Since importance of improving of Intelligent Transportation System (ITS) always follow modern trends by using new wireless communication technologies, the trend of latest research topics is focusing on Vehicular Ad Hoc Network (VANET). VANET networks play a vital role in ITS due to their increasing importance for the building of ITS. VANET is a subclass of mobile ad-hoc networks (MANET). VANET depends on wireless technologies to establish communication between moving vehicles (nodes). An appropriate and efficient routing protocol helps to successful exchange data between mobility nodes in vehicular ad-hoc networks. VANET has a lot of similar features to MANETs such as finite bandwidth, self-arrangement, self-administration, and unstable network topology. Except it has some important features of its characteristic such as very high node mobility, delay restrictions, and frequent

network outages. For this reason, routing in VANET networks is much more complex than routing in MANET networks. The purpose of this study - to evaluate the performance of protocols AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) and DSR (Dynamic Source Routing) and their impact on the performance of networks VANET. This paper differs in that it analyses the impact of network size at a large number of nodes, and different vehicle speeds on network performance metrics like packet delivery ratio, throughput, average delay, overhead and packet loss ratio and assessing the level of network performance at realistic mobility scenarios for the movement of vehicles in the street generated by Bonnmotion tool. Also, the simulation is carried out in NS-3 simulator to create VANET network topology and routing protocols.

Keywords: reactive routing protocols, VANET, NS-3, Bonnmotion, network performance

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Автомобильная специальная сеть (VANET) – это технология интеллектуальной транспортной системы (ITS), которая обеспечивает множество приложений, таких как трансляция сообщений безопасности, динамическое планирование путешествий, игры, развлечения и другие приложения [1].

Автомобильные сети Ад-Нос (VANET) – это тип специальной сети, в настоящее время привлекающей внимание исследователей благодаря некоторым важным характеристикам, которые отличают ее от других сетей, поскольку она характеризуется часто изменяющейся топологией сети и саморегулирующейся связью. Следовательно, методы маршрутизации VANET представляют собой серьезную исследовательскую проблему из-за характера топологии сети, поэтому традиционные протоколы маршрутизации должны постоянно развиваться, чтобы приспособиться к этим ненадежным условиям. Таким образом, прилагаются все большие усилия по разработке протоколов маршрутизации [2]. В данной статье изучается производительность двух протоколов реактивной маршрутизации, чтобы ответить на следующие три вопроса:

1. В чем основные различия между AODV и DSR?
2. Какой протокол маршрутизации обеспечивает лучшую производительность в сети VANET?
3. Какое влияние оказывают некоторые факторы (количество узлов, скорость узла) на производительность этих протоколов маршрутизации?

Пытаясь ответить на вышеуказанные вопросы, мы использовали ns3 для сравнения производительности двух протоколов AODV и DSR, чтобы изучить влияние мобильности и размера сети на поведение этих протоколов.

В последние годы были предприняты значительные усилия для оценки производительности традиционных протоколов маршрутизации в автомобильных специальных сетях и определения их сильных и слабых сторон в соответствии с одноранговыми сетями. В [3] Н. Чандель и В. Гупта использовали SUMO и NS2 для моделирования протоколов маршрутизации AODV, DSDV и DSR с реалистичной моделью мобильности. Они показали, что AODV лучше для коэффициента доставки пакетов, чем DSR и DSDV, тогда как DSR имеет в основном более высокую пропускную способность, чем DSDV и AODV. П. Ракхи и другие [4] использовали симулятор NS-2 для сравнения проактивных DSDV и реактивных протоколов DSR на основе двух показателей производительности сетевой пропускной способности и коэффициента доставки пакетов. Результаты показали, что DSR является более предпочтительным и более эффективным протоколом. А. Мохамед и другие [5] оценили производительность AODV, DSR и OLSR в городских сценариях с различными показателями, такими как мобильность узлов, плотность транспортных средств, и с различными скоростями трафика. Результаты показали, что OLSR лучше всего работает в большинстве смоделированных дорожных ситуаций.

Обзор существующих протоколов маршрутизации. Протоколы маршрутизации. Протоколы специальной маршрутизации определяют подходящий маршрут между источником и пунктом назначения. В одноранговых сетях протоколы маршрутизации делятся на три основные группы: проактивные, реактивные и гибридные [2]. В этой статье мы сосредоточились на протоколах реактивной маршрутизации, чтобы изучить влияние реализации двух протоколов AODV и DSR на производительность сети в VANET, и сравнили показатели производительности между ними. Остановимся на протоколах реактивной маршрутизации более подробно.

Протоколы реактивной маршрутизации. Этот метод протоколов имеет две особенности, которые отличаются от проактивного метода. Во-первых, они не хранят информацию обо всей сети, а хранят информацию только об узлах используемого маршрута. Вторая особенность заключается в том, что они не запускают обнаружение маршрута сами, пока исходный узел не потребует маршрут к узлу назначения [6].

Некоторые особенности реактивных протоколов [7, 8]:

1. Узел источника требует маршрута к месту назначения, когда это необходимо.
2. Узел источника использует метод лавинной рассылки при обработке обнаружения маршрута путем распространения сообщения запроса маршрута, пока запрос не достигнет пункта назначения.

3. В связи с поддержанием только активного маршрута накладные расходы в сети уменьшаются.

Напротив, основными недостатками этих протоколов являются [9]:

1. Большое время задержки для обнаружения маршрута.
2. Засорение сети из-за чрезмерного затопления.

Существуют различные типы протоколов реактивной маршрутизации, такие как Dynamic Source Routing (DSR), Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV), Temporarily Ordered Routing Algorithm (TORA). Протоколы реактивной маршрутизации можно разделить на два типа: маршрутизация источника и хоп за хопом [10, 11].

Протокол маршрутизации Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV). AODV – это протокол реактивной маршрутизации по требованию, основанный на принципах протоколов маршрутизации с вектором расстояния. Это протокол пошаговой маршрутизации. Каждый узел в сети периодически отправляет приветственные сообщения, чтобы узнать своих соседей. Когда узел должен отправить пакет в пункт назначения, который не является соседом и еще не имеет маршрута в его таблице маршрутизации, если у него нет маршрута к месту назначения, он транслирует пакет запроса маршрута (RREQ) своим соседям, которые, в свою очередь, повторно отправляют запрос, пока пакет не достигнет места назначения. Затем пункт назначения пересылает ответный пакет маршрута (RREP). AODV хранит только активные маршруты и отправляет запрос маршрутизации именно тогда, когда он нужен узлу [2, 5, 11].

Динамическая маршрутизация от источника (DSR). DSR – это протокол реактивной маршрутизации по запросу, основанный на концепции маршрутизации от источника. Когда узлу нужен маршрут к месту назначения, он отправляет сообщение с запросом маршрута. Затем этот запрос маршрута транслируется с адресом источника и пункта назначения. Затем он передает сообщение своим соседям, которые, в свою очередь, повторно отправляют запрос, пока пакет не достигнет пункта назначения, и каждый узел добавляет свой адрес. Таким образом, маршрут, по которому проходит пакет, включается в заголовок пакета данных от источника до пункта назначения. Наконец, пункт назначения получает сообщение запроса маршрута и отправляет обратно сообщение ответа маршрута, которое состоит из информации о маршруте, прикрепленной к сообщению запроса маршрута [4, 10].

DSR аналогичен AODV с некоторыми отличиями. Сначала на этапе обнаружения маршрута каждый узел передает весь путь, в отличие от AODV, который отправляет только следующий переход. Во-вторых, обнаруженный маршрут сохраняется в течение определенного периода времени. Другое дело, что узел-источник отправляет пакет RREQ путем лавинной рассылки сети, в отличие от AODV, который периодически отправляет приветственные сообщения, чтобы узнать своих соседей. Кроме того, каждый узел отвечает за подтверждение того, что следующий переход получит пакет. Если пакет не может быть получен узлом, он повторно передается до некоторого максимального числа раз, пока не будет получено подтверждение от следующего перехода.

Таблица – Протоколы маршрутизации AODV и DSR

год	Протокол маршрутизации	Основные термины
2003 RFC 3561	AODV Ad hoc дистанционно-векторный алгоритм маршрутизации	порядковый номер, три типа сообщений; RREQ, RREP, и RERR, поиск маршрута, информация о маршрутизации в таблице маршрутизации
2007 RFC 4728	DSR динамическая маршрутизация от источника	порядковый номер, три типа сообщений; RREQ, RREP, и RERR, поиск маршрута, информация о маршрутизации в заголовке пакета

Методология моделирования. Все симуляции проводились с помощью сетевого симулятора NS3. В результатах, полученных после сравнения с двумя протоколами реактивной маршрутизации, AODV и DSR, характеристики протоколов оцениваются путем измерения четырех хорошо известных показателей: отношения пакетов к доставке (PDR), пропускной способности, накладных расходов, коэффициента потери пакетов и задержки. Мы оценили производительность и изучили влияние изменения количества узлов и скорости узла с различными сценариями с помощью этого моделирования.

Метрики производительности. Для оценки протоколов маршрутизации и их влияния на производительность VANET рассматриваются следующие показатели производительности:

1. Коэффициент доставки пакетов (PDR): это количество пакетов, доставленных в пункт назначения. Чем выше коэффициент доставки пакетов, тем лучше протокол маршрутизации.

$$\text{коэффициент доставки пакетов} = \frac{\text{количество полученных пакетов}}{\text{общее количество отправленных пакетов}} * 100 \%$$

2. Коэффициент потери пакетов (PLR): это количество пакетов, которые не были получены адресатом. Эти пакеты теряются во время передачи от источника к месту назначения. Отсутствие пакета может быть связано с ухудшением качества сигнала, поврежденными пакетами или перегрузкой. Чем меньше отсутствующих пакетов, тем лучше протокол маршрутизации.

$$\text{коэффициент потери пакетов} = \frac{\text{количество потерянных пакетов}}{\text{общее количество отправленных пакетов}} * 100.$$

3. Пропускная способность: определяется как количество пакетов, полученных в пункте назначения, из общего числа переданных пакетов.

$$\text{пропускная способность} = \frac{\text{размер пакета}}{\text{полученные пакеты}} * \frac{8}{100}$$

4. Средняя задержка: общее время передачи пакета от источника к узлу назначения известно как сквозная задержка. Показатель производительности задержки включает задержки из-за обнаружения маршрута, распространения и отправки пакета, а также времени ожидания пакета в очереди.

$$\begin{aligned} \text{средняя задержка} &= \\ &= \frac{\sum \text{время получения пакета данных} - \text{время отправления пакета данных}}{\text{общее количество полученных пакетов}} \end{aligned}$$

5. Накладные расходы: показатель представляет количество байтов маршрутизации, требуемых протоколами маршрутизации для построения и обслуживания своих маршрутов. Он включает все типы пакетов маршрутизации (запрос, ответ, ошибка) в сети.

$$\text{накладные расходы} = \frac{\text{общее количество пакетов маршрутизации}}{\text{общее количество полученных пакетов данных}}$$

Системная модель. Мы использовали инструмент Bonnmotion, чтобы получить модель Манхэттена для реалистичного сценария мобильности автомобилей для имитации модели движения мобильных узлов на улицах. После этого будет создан файл мобильности (сценарий ns_movements), который используется в качестве входных данных для программы ns3 для изучения влияния реализации протоколов маршрутизации в VANET на реалистичную мобильность транспортных средств.

В своей работе мы выбрали модель мобильности Manhattan Grid, которая моделирует движение в среде городских улиц. Модель MG использует топологию сетки, которая представляет улицы в городе, чтобы имитировать движение в городской зоне. В этой модели узлы перемещаются в вертикальном или горизонтальном направлении на карте города.

Моделирование и анализ производительности. Мы проанализировали производительность протоколов AODV и DSR по отдельности с изменением количества узлов и изменением скорости узла.

1. Влияние количества автомобилей.

Мы проанализировали и оценили производительность протокола AODV и DSR в VANET для различных сценариев с 50, 100, 150, 200, 250 автомобилями.

На рисунке 1 показаны результаты коэффициента доставки пакетов (PDR) для протокола маршрутизации AODV и DSR при разном количестве транспортных средств. Можно заметить, что AODV достиг на 7 % большего значения PDR, чем DSR, с повышенной плотностью трафика в сети с точки зрения 50 и 250 транспортных средств. Протокол AODV обеспечивает более высокий коэффициент доставки пакетов по сравнению с протоколами DSR. Это связано с тем, что в протоколе AODV все промежуточные узлы разделяют нагрузку маршрутизации, то есть каждый узел на пути использует самую последнюю информацию маршрутизации для пересылки пакетов. Высокий PDR отражает эффективность специальных протоколов маршрутизации.

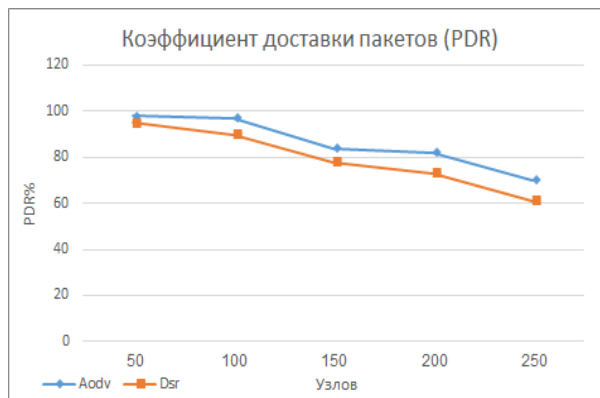


Рисунок 1 – Коэффициент доставки пакетов в зависимости от размера сети

Изучая общую кривую оценки производительности на рисунке 2, мы видим, что более высокая пропускная способность достигается протоколом маршрутизации DSR. Оба протокола обеспечивают лучшую пропускную способность для меньшего количества узлов при мобильности. Анализируя результаты, можно заметить, что пропускная способность VANET снижается при увеличении количества узлов в обоих протоколах маршрутизации.

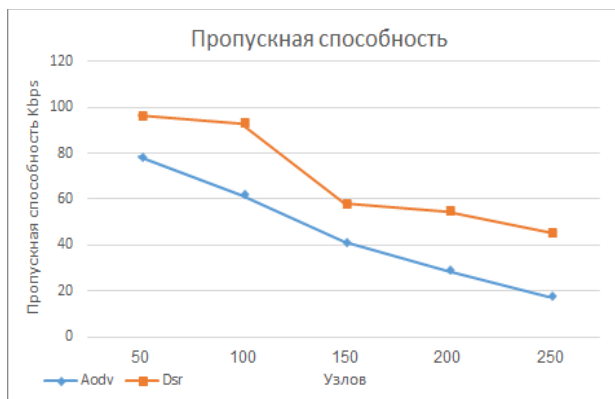


Рисунок 2 – Пропускная способность в зависимости от размера сети

На рисунке 3 представлена средняя задержка для разного количества транспортных средств и протоколов маршрутизации. Можно заметить, что самая низкая средняя задержка у AODV, что показывает лучшую производительность по сравнению с протоколом DSR. Более высокое значение задержки в DSR в основном связано с кешированием и отсутствием механизмов истечения срока действия устаревших маршрутов, что может вызвать повторные передачи и вызвать чрезмерные задержки.

Объемы накладных расходов показаны на рисунке 4 для различного количества транспортных средств и протоколов маршрутизации. Мы можем наблюдать, что накладные расходы увеличиваются с увеличением количества транспортных средств как для протокола AODV, так и для протокола DSR, поскольку оба протокола генерируют большое количество накладных расходов, можно сделать вывод, что DSR генерирует больше накладных расходов и не подходит для больших сетей.

На рисунке 5 показан коэффициент потери пакетов для двух протоколов реактивной маршрутизации (AODV, DSR) и различного количества транспортных средств в сети. Мы можем наблюдать, что коэффициент потери пакетов увеличивается с увеличением количества узлов в сети. В протоколе AODV он увеличивается с 2 до 30 % при сценарии с 250 автомобилями, тогда как протокол DSR уве-

личивается до 39 % для сценария с таким же количеством транспортных средств. Также интересно отметить, что потеря пакетов будет ниже для меньшего количества транспортных средств в сети. Протокол маршрутизации AODV показывает более низкий коэффициент потери пакетов по сравнению с DSR для равного количества транспортных средств. Анализируя эти результаты, можно заметить, что PLR резко возрастает по мере увеличения количества узлов.

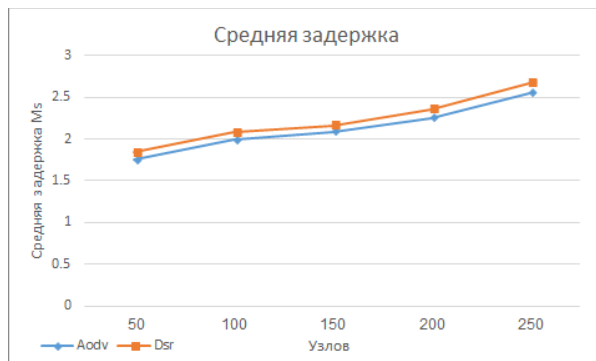


Рисунок 3 – Средняя задержка в зависимости от размера сети

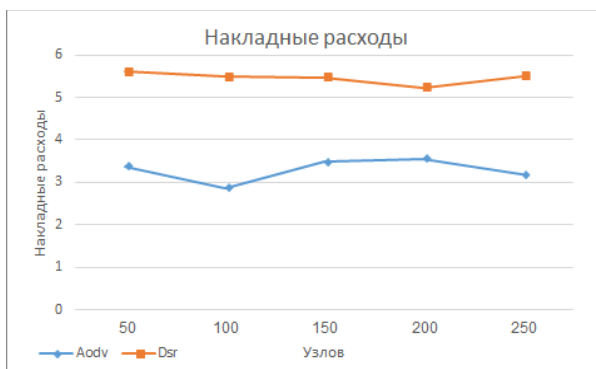


Рисунок 4 – Накладные расходы в зависимости от размера сети

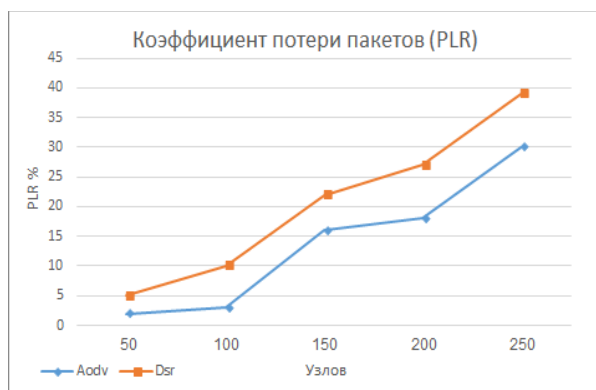


Рисунок 5 – Коэффициент потери пакетов в зависимости от размера сети

Основываясь на вышеприведенных результатах, мы можем сделать вывод, что протокол AODV более эффективен, чем протокол DSR, для предлагаемого нами VANET для реалистичного сценария мобильности транспортных средств (модель Манхэттена). Также это подходящее решение для приложений безопасности, которые требуют надежной передачи пакетов данных и чувствительны к задержкам.

2. Влияние скорости автомобиля.

Мы проанализировали и оценили производительность протокола AODV и DSR в VANET для различных сценариев с 50 автомобилями и со скоростями автомобиля 10, 20, 30, 40 и 50 (м/с).

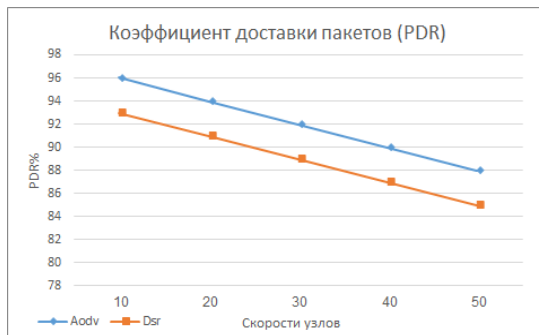


Рисунок 6 – Коэффициент доставки пакетов в зависимости от скорости автомобиля

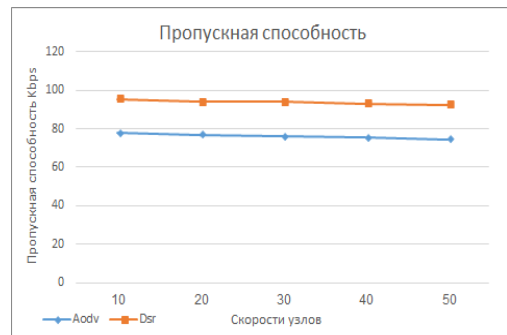


Рисунок 7 – Пропускная способность в зависимости от скорости автомобиля

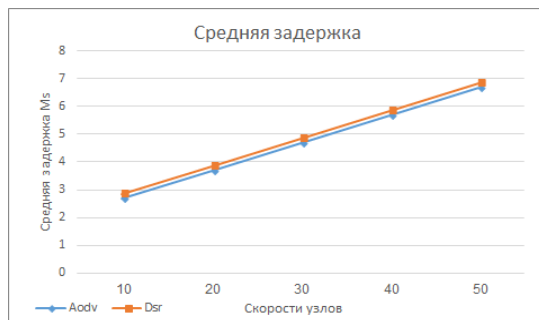


Рисунок 8 – Средняя задержка в зависимости от скорости автомобиля

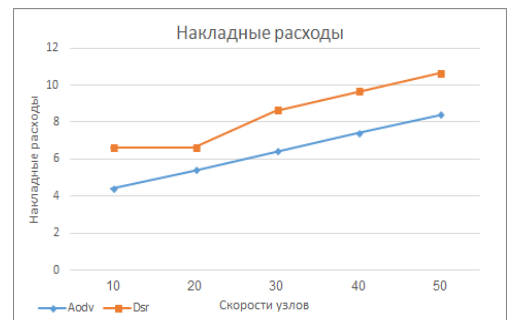


Рисунок 9 – Накладные расходы в зависимости от скорости автомобиля

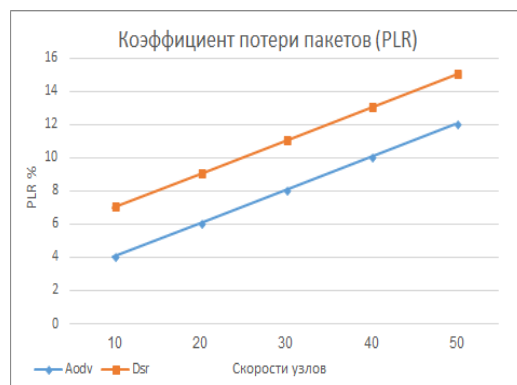


Рисунок 10 – Коэффициент потери пакетов в зависимости от скорости автомобиля

Из предыдущих результатов изменения скорости узлов с количеством узлов 50 видно, что увеличение скорости узла влияет на все значения параметров производительности сети, то есть увеличение скорости приводит к снижению эффективности протоколов. Для производительности AODV в зависимости от скорости транспортного средства коэффициент доставки пакетов снизился на 8 %, таким образом увеличивая коэффициент потери пакетов на 8 %. Средняя задержка в сети увеличилась почти на 150 %. А накладные расходы увеличились на 91 %, тогда как пропускная способность снизилась на 4 %. в то время как в DSR, коэффициент доставки пакетов снизился на 8 %, что увеличило коэффициент потери пакетов на 8 %. Средняя задержка в сети увеличилась почти на 140 %. Накладные расходы увеличились на 60 %, тогда как пропускная способность снизилась на 3 %.

Заключение. Научная значимость работы состоит в аргументированной сравнительной характеристике эффективности применения распространенных протоколов маршрутизации для сетей VANET с использованием симуляторов Bonnmotion и NS3. В статье выявлены различия между двумя популярными протоколами реактивной маршрутизации (AODV, DSR) и проведено сравнение протоколов маршрутизации друг с другом в VANET. В этом исследовании мы сосредоточились

на оценке влияния изменения количества узлов и скорости узла на производительность сети. Мы изучили зависимость протокола маршрутизации от большого размера сети и высокой мобильности VANET. Область применения этого исследования – программы и приложения интеллектуальных транспортных систем для улучшения дорожного движения и предотвращения аварий за счет своевременного обмена данными между транспортными средствами и обеспечения доставки данных. Поэтому было проведено сравнение двух протоколов, чтобы определить лучший и наиболее подходящий протокол для сетевой среды VANET.

Основываясь на приведенных выше результатах, можно сделать вывод, что выбор протокола в VANET усложняется из-за высокой скорости узлов, что отрицательно сказывается на производительности обоих протоколов. Выделение ряда преимуществ и выявление проблем каждого из алгоритмов дает основания судить, что AODV превосходит DSR по производительности. При этом негативное влияние на производительность протоколов за счет увеличения количества узлов гораздо больше, чем от увеличения скорости узлов. В уточнение к вышесказанному: ряд особенностей, пересекающихся с множеством малоизученных вопросов непостоянства структуры и состава сетей VANET, оставляет место для будущих исследований по улучшению протокола.

Библиографический список

1. Akhtar, N. VANET Topology Characteristics under Realistic Mobility and Channel Models / N. Akhtar, O. Ozkasap // *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. – 2013. – P. 1774–1779.
2. Jain, M. Overview of VANET: Requirements and its routing protocols / M. Jain, R. Saxena // *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*. – 2017. – P. 1957–1961.
3. Chandel, N. Comparative Analysis of AODV, DSR and DSDV Routing Protocols for VANET City Scenario / N. Chandel, V. Gupta // *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. – 2014. – Vol. 2, № 6. – P. 1380–1384.
4. Purohit, R. Performance Evaluation of Ad Hoc Network Routing Protocols with NS2. / R. Purohit, H. Choudhary, V. Choudhary // *IJCSET*. – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. 787–791.
5. Ahmed, M. Performance Study of Various Routing Protocols in VANET Case of Study / M. Ahmed, A. B. Anouar, M. Bouhorma, K. Ben Ahmed // *International Journal of Future Generation Communication & Networking*. – 2014. – Vol. 7, № 6. – P. 231–240.
6. Kalwar, S. Introduction to reactive protocol / S. Kalwar // *IEEE Potentials*. – 2010. – Vol. 29, № 2. – P. 34–35.
7. Shobha, K. R. Efficient flooding using relay routing in on-demand Routing protocol for Mobile Adhoc Networks / K. Shobha R., K. Rajanikanth // *IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*. – 2009. – P. 316–321.
8. Watfa, M. Advances in vehicular ad-hoc networks: developments and challenges / M. Watfa. – University of Wollongong, UAE, 2010. – 384 p.
9. Bijan, P. VANET Routing Protocols: Pros and Cons / P. Bijan, Md. Ibrahim, Md. Bikas // *International Journal of Computer Applications*. – 2011. – Vol. 20, № 3. – P. 28–34.
10. Khatri, P. Performance Study of Ad-Hoc Reactive Routing Protocols / P. Khatri, R. Rajput, A. Shastri // *Journal of Computer Science*. – 2010. – Vol. 6, № 10. – P. 1159–1163.
11. El-Sayed, H. Hop by Hop Routing Problems in MANETs / H. El-Sayed // *Mathematics & Information Sciences Letters an International Journal*. – 2017. – Vol. 2. – P. 1–5.

References

1. Akhtar, N., Ozkasap, O. VANET Topology Characteristics under Realistic Mobility and Channel Models. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2013, pp. 1774–1779.
2. Jain, M., Saxena, R. Overview of VANET: Requirements and its routing protocols. *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 2017, pp. 1957–1961.
3. Chandel, N., Gupta, V. Comparative Analysis of AODV, DSR and DSDV Routing Protocols for VANET City Scenario. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2014, vol. 2, no. 6, pp. 1380–1384.
4. Purohit R., Choudhary, H., Choudhary, V. Performance Evaluation of Ad Hoc Network Routing Protocols with NS2. *IJCSET*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 787–791.
5. Ahmed, M., Anouar, A. B., Bouhorma, M., Ben, Ahmed K. Performance Study of Various Routing Protocols in VANET Case of Study. *International Journal of Future Generation Communication & Networking*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 231–240.
6. Kalwar, S. Introduction to reactive protocol. *IEEE Potentials*, 2010, vol. 29, no. 2, pp. 34–35.
7. Shobha, K. R., Rajanikanth, K. Efficient flooding using relay routing in on-demand Routing protocol for Mobile Adhoc Networks. *IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, 2009, pp. 316–321.
8. Watfa, M. *Advances in vehicular ad-hoc networks: developments and challenges*. University of Wollongong, UAE, 2010. 384 p.
9. Bijan, P., Ibrahim, Md., Bikas, Md. VANET Routing Protocols: Pros and Cons. *International Journal of Computer Applications*, 2011, vol. 20, no. 3, pp. 28–34.
10. Khatri, P., Rajput, R., Shastri, A. Performance Study of Ad-Hoc Reactive Routing Protocols. *Journal of Computer Science*, 2010, vol. 6, no. 10, pp. 1159–1163.
11. El-Sayed, H. Hop by Hop Routing Problems in MANETs. *Mathematics & Information Sciences Letters An International Journal*, 2017, vol. 2, pp. 1–5.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

DOI 10.21672/2074-1707.2021.55.3.098-109

УДК 004.021, 004.94

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТЕЙ В ЗАДАЧЕ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ¹

Статья поступила в редакцию 11.05.2021, в окончательной версии – 17.07.2021.

Попов Сергей Геннадьевич, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, доцент, кандидат технических наук, e-mail: popovserge@spbstu.ru

Крашенинников Александр Сергеевич, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, аспирант, e-mail: contr239@mail.ru

Работа посвящена построению и исследованию реализации управляемого менеджера потоков для многопоточных вычислительных систем в контексте транспортной задачи управления гетерогенной группой роботов. Целью работы является исследование параметров менеджера потоков для нахождения субоптимальной конфигурации для решения задачи распределения ресурсов между вычислительными устройствами среды выполнения для формирования практических рекомендаций по настройке разработанного программного обеспечения. В ходе работы проведена серия экспериментов с менеджером потоков, установлены экспериментальные зависимости производительности вычислительной системы от параметров конфигурации менеджера. При проведении экспериментов установлена субоптимальная конфигурация менеджера потоков на основе следующих параметров: количество логических потоков, размер пакета подзадач для вычисления, количество разбиений задачи на подзадачи. Результаты использованы при построении подсистемы управления вычислительными потоками в программном обеспечении менеджера потоков вычисления маршрутов.

Ключевые слова: робот, алгоритм, многопоточность, производительность, оптимизация, гетерогенный, поток, субоптимальный

STUDY THE ALGORITHM OF PATHS CALCULATION PARALLELIZATION IN THE PROBLEM OF GROUP CONTROL OF ROBOTS

The article has been received by editorial board 11.05.2021, in the final version – 17.07.2021.

Popov Sergey G., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation,

Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering), e-mail: popovserge@spbstu.ru

Krashennnikov Alexander S., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation,

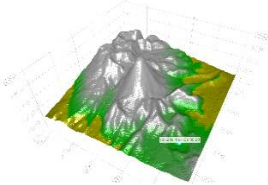
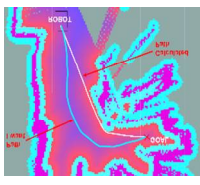
post-graduate student, e-mail: contr239@mail.ru

The work is about development and study of the implementation of a multithreaded flow manager in computing systems for the transport problem of controlling a heterogeneous group of robots. The aim of the work is to study the parameters of the thread manager in order to find a suboptimal configuration for solving the task of managing computation resources and formulating practical recommendations for configuration the developed software as well. In the work, a series of experiments were carried out on the thread manager, experimental dependences of the computing system performance on the manager's configuration parameters were established. In the course of the experiments was established that it is possible to find the suboptimal configuration of the thread manager on the basis of the parameters, such as: the number of logical threads, the size of the batch of subtasks for computation, the number of the subtasks. The results will be used in when the creating of a subsystem for managing computational threads of the general problem, and can be used in other applied problems together with a portable software in the software of the routes computation threads manager.

Keywords: robot, algorithm, multithreading, performance, optimization, heterogeneous, thread, suboptimal

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-29-03250 мк (The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-2903250 mk).

Графическая аннотация (Graphical annotation)

Группа роботов (Robots group)	Построение путей (Path finding)	Распараллеливание вычислений (Parallel computing)	Вычисленные пути (Calculated routes)
План построения путей (Route calculated planning)	Оптимизация вычислений (Calculation optimization)	Вычисленные пути (Route)	
			

Введение. Многопоточный метод позволяет максимально использовать имеющиеся вычислительные ресурсы, так как специальным образом настроенное ПО позволяет оптимизировать и диспетчеризовать многопоточные вычисления. По результатам исследования [2] сформулирована постановка задачи о поиске субоптимальной конфигурации настроек менеджера потоков, так как влияние ключевых параметров, таких как количество задач в пакете или количество логических потоков, оказывает значительное влияние на время вычисления путей. Ручной подбор параметров трудоемок и не гарантирует выбор наилучшей конфигурации. В целом представленные исследования являются расширением работ по части автоматического управления менеджером потоков. Это приводит к тому, что ручная настройка параметров инструмента весьма вероятно приведет к неэффективному использованию, а в некоторых случаях может замедлить расчет до уровня однопоточного выполнения. Поэтому автоматическое вычисление субоптимальной конфигурации настроек менеджера памяти в контексте прикладной задачи [1] на заранее определенной вычислительной системе также является важной научно-технической задачей, а работа в целом является расширением работ по автоматическому управлению менеджером потоков.

Связанные работы. Многопоточность в качестве фактора быстродействия оценивается как фиксированный фактор [3]. В рассматриваемых задачах сортировки такой подход уместен, так как разбиение по потокам происходит по сути в сплошной среде задач. Весь набор подзадач получается однотипным и оптимальным вариантом является простой одновременный запуск количества задач по количеству потоков. Исследование различных многопоточных модификаций алгоритма A^* [4] привели к заключению о высокой эффективности вычисления каждого отдельного пути в отдельном потоке и низкой эффективности распараллеливания многопоточного расчета параметров внутри одного маршрута. Дальнейшие предложенные модификации A^* связаны с исключительно адаптацией алгоритма для задачи и одновременного расчета нескольких путей. Идея комбинации многопоточного подхода с оптимизацией фрагментации путей в статье не рассмотрена, однако имеет шансы на улучшение времени выполнения расчетов.

Интересные варианты применения многопоточного подхода связаны с генетическим алгоритмом [5, 13]. Этот алгоритм не параллелизуется, так как имеет итеративную основу и четкую последовательность действий. Однако нюансы реализации позволяют выделить в отдельные потоки запись популяции в БД и графическое построение текущей итерации с целью наглядности. По сути время расчета на программном комплексе сведено ко времени расчета базовой частью алгоритма.

Непосредственное взаимодействие на низком уровне с вычислительной средой рассматривается как отдельная задача [6]. Один из важных выводов: отсутствие средств исследования динамических характеристик создаваемых пользователями алгоритмов.

На скорость вычисления может также влиять непосредственная реализация алгоритма [7]. По сути, используемые многими готовые решения в виде контейнеров и встроенных алгоритмов могут содержать избыточную информацию для контекста задачи и вызывать дополнительные расходы ресурсов вычислительной системы.

Возвращаясь к математическим аспектам, следует уделить внимание критериям оптимизации [8]. В исследовании, которому посвящена статья используется динамическая модель. Однако подбор критериев позволяет утверждать о возможности развития текущей статической модели до динамической с более обширным подбором критериев.

Рассмотрение задачи с точки зрения теории управления также позволяет понять многие аспекты целевой среды [9]. Разбиение задачи на синтез и обеспечение устойчивости относительно точки пространства состояний с использованием эволюционных методов позволяет получить высокоуровневые функции управления, что в широком смысле соответствует определению стратегий из первой части исследования [1]. Подобный подход показывает отличный результат на синтетических тестах, однако требует обширного рассмотрения на реальных данных для решения об использовании его в целевой задаче.

Идея исследования местности с воздуха известная, и различные варианты действий предлагались и ранее [10]. В целом, гетерогенная группа роботов позволяет разделить задачи и на начальном этапе создать подобие пайплайна, чтобы затем развивать модель в сторону динамической. Однако в постановке задачи обозначен только один дрон, что не позволяет использовать параллельные вычисления для группы.

Разделение задач на группы рассматривается с разных ракурсов. Интересный вариант предложен с использованием облачных вычислений [11]. Идея заключается в декомпозиции общей задачи использованием специальных способов программирования алгоритмов при решении. Линейное распределение, роевое решение и синтез решений представляют достаточно возможностей для подобного подхода. По результатам статьи успешно апробированы разработанные алгоритмы. Однако вызывает вопросы использование виртуальных машин в облачном сервисе. Требуется уточнение характеристик системы в части производительности.

Также по технической части продолжаются исследования в области использования ГП в прикладных задачах [12]. Известно, что производительность GPU в некоторых задачах значительно превышает производительность CPU. Алгоритм нахождения пути несколько отличается от используемого в настоящем исследовании, однако реализованный параллельный алгоритм на программно-аппаратной архитектуре CUDA показывает значительное улучшение производительности.

Технологический аспект в некотором смысле подвергся более углубленному анализу [14]. В статье рассматривалась непосредственно физическая часть многоядерного процессора. По части архитектуры изыскания проводились примерно с момента, как стало понятно, что при современной технологии создания чипов очень скоро будет достигнут предел по рабочей частоте, поэтому необходимо масштабировать другую характеристику – количество агентов.

Наиболее близкой к глобальной идее менеджера потоков можно считать DDMT (Data Driven MultiThreading) [15]. Идея подхода заключается в адаптации внутренних алгоритмов работы ядра под приходящие на расчет данные. Однако целью работы являлось улучшение производительности оптимизацией нагрузки на кеши различных уровней.

Стратегия оптимизации, непосредственно связанная с многопоточностью, также стала частью созданной SensorOS [16, 17]. Специальная операционная система создана для многоагентных задач, где критичен аспект времени. Идея заключалась в согласованном функционировании множества агентов с SensorOS на борту.

Одним из следующих шагов настоящего исследования станет переход к реальным данным. В подобном контексте потребуется предобработка для получения данных для алгоритма поиска пути. Предложенный в статье динамический вариант с использованием триангуляции Делоне и модифицированным алгоритмом A^* [18] может значительно упростить задачу перехода от синтетических данных к реальным.

В продолжение темы об «уходе» от теоретических моделей следует вспомнить аспект многоагентной [19] системы. Вопрос эмуляции централизованного контроля, на первый взгляд, несет неочевидные преимущества. Но если рассмотреть общую схему функционирования системы из настоящего исследования, то возникает вопрос об аспекте принятия решений. В условиях и решении явно не указано отсутствие центрального узла, так как этот вариант постановки планируется рассматривать в дальнейшем. Тем не менее, материал статьи позволяет заранее получить большее понимание возможностей реализации, и, на этом основании скорректировать алгоритм поиска путей.

Немаловажным аспектом при переходе к динамической системе является своевременное обнаружение препятствий на пути наземного робота. На данном этапе эта задача «переложена» на дроны, однако существуют задачи, где они неприменимы. Исследование местности внутри заброшенного завода, например, не позволяет эффективно использовать воздушные единицы без специального дорогостоящего оборудования из-за препятствий в том числе и сверху. Предложенная в статье модель визуального обнаружения препятствий [20] позволяет с использованием обычной видеокамеры с некоторой точностью оцифровывать препятствия и добавлять их в алгоритм поиска пути, как обработанные данные. Эффективность функционирования в сложных условиях при этом «остается открытым» и требует натурных испытаний.

Возвращаясь к вопросам, собственно, алгоритма, необходимо рассмотреть вариант кооперативного алгоритма A^* –ICA*. Идея заключается в наличии штрафных функций за углы поворота и пересечения путей других агентов. Алгоритм показал хорошую производительность. Однако в контексте настоящего исследования требуется учитывать решение задачи построения покрытия, что создает дополнительные условия и может негативно влиять на штрафные функции. Возможным решением является попеременное использование алгоритмов A^* и ICA*. При этом A^* будет использоваться на траектории построения покрытия, когда активен радар, а ICA* при перемещении между этими траекториями.

Таким образом, в контексте текущего исследования построение алгоритмов и разработке программного модуля, связывающего алгоритмическую часть решения задачи с операционной системой и многопоточными вычислениями, является востребованным и важным с точки зрения оптимизации использования ресурсов вычислительной системы.

Постановка задачи предметной области. Дана карта M и гетерогенная группа роботов R . Для карты M могут быть сделаны экспликации $M_g = \{G, Y, R\}$ для наземного робота, где G – зоны свободные для передвижения, Y – опасные зоны, к которым относятся большие углы продольного/поперечного наклона, R – закрытые для перемещения зоны, как то, вода, лава или непроходимые заросли, и экспликация $M_f = \{H\}$ для летающих роботов, где H – карта минимальных высот полета. Реализация карты сохраняется в масштабе достаточном для составления точного пути наземным роботом, при этом вначале выполнения задачи карта не известна.

Группа роботов $R = \{F, G\}$ состоит из: $F = \{f_1, \dots, f_n\}$ – подгруппа из n летающих роботов, а $G = \{g_1\}$ – подгруппа из одного наземного робота. Робот $f = \{C, v, r, h_{max}\}$ имеет радиус обзора карты r , среднюю скорость полета v , затраты энергии в единицу времени C и максимальную высоту полета h_{max} , обусловленную внешними факторами: погода или мощность радиопередатчиков. Летающий робот составляет актуальную карту крупного масштаба. Робот $g = \{C, r, E, \alpha, \beta\}$ радиус обзора карты r , затраты энергии на единицу пройденного расстояния, зависящие от угла въезда δ $C = C(\delta)$, максимальный запас энергии E , максимальный угол поперечного крена – угол сваливания α , максимальный угол въезда β .

В рамках задачи требуется построить такой маршрут от точки A до точки B , чтобы минимизировать суммарные затраты энергии группы и не превысить углы сваливания и въезда для наземного робота.

В этом случае общая постановка сводится к задаче двухкритериальной оптимизации:

$$\min_{\underline{x} \in S} \{f_1(\underline{x}), f_2(\underline{x})\},$$

где $f_i: R^n \rightarrow R$ – это целевые функции, отвечающие за расход энергии в полёте и допустимости движения наземного робота по углам. Векторы решений $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ принадлежат непустой области определения S .

В случаях многокритериальной оптимизации критерии удовлетворенности для различных целевых функций, как правило, конфликтуют, потому что задача оптимизации часто имеет дополнительные условия в виде приоритетов критериев.

Постановка задачи оптимизации. В ходе решения общей задачи возникает подзадача многократного вычисления путей для каждого робота группы. Зная промежуточные точки, путь можно поделить на фрагменты, которые могут быть выполнены параллельно. При централизованном расчете путей в системе реального времени возникает вопрос о времени расчета участка или всего пути целиком для каждого конкретного робота. Для первой итерации в наших интересах как можно раньше запустить конкретный дрон. На местности могут быть зоны, недоступные для полетов, поэтому считается, что дрон начинает движение, только когда путь полностью рассчитан. В этом случае можем сформулировать критерий субоптимальности выбранной стратегии проведения расчета. Для n роботов имеем задачу оптимизации:

$$\min_{\underline{x} \in S} \sum_{i=1}^n T_{s_i},$$

где T_{s_i} – время старта(S) или время окончания расчета полного пути i -го робота; strat – выбранная стратегия расчета пути.

С учетом сказанного на предыдущих этапах исследования стратегия характеризуется следующими пунктами:

- количество логических потоков в целевой системе расчета (h);

- размер пакета задач для расчета через менеджер потоков (p);
- количество разбиений пути на подпути (s).

Метод распределения задач по потокам. Кроме перечисленного выше, имеется один важный аспект – порядок попадания задач для расчета в менеджер потоков (o). Предположительно, влияние этого параметра будет наименьшим на заданном этапе с учетом невозможности запуска робота без полного расчета. Рассмотрение аспекта позволит сравнить результат в дальнейшем, когда возможность начать движение по неполному пути станет доступна.

В этом случае можно уточнить формулу:

$$\min_{\{h,p,s\}} \sum_{i=1}^n T_{si}.$$

Такое распределение позволит учесть большее количество параметров математической модели и параметров вычислительной системы.

Исследование влияния стратегии расчета на готовность пути. Основной идеей эксперимента является обнаружение зависимостей времени готовности путей от числа разбиений пути на подпути, количества логических потоков, количества задач в пакете. Вначале имеется предположение о том, что наибольшее влияние на сумму из формулы окажет количество логических потоков, как наиболее явный ограничитель. В предыдущей части [2] проверено влияние превышения количества логических потоков над количеством потоков доступных ОС, и результат показал нецелесообразность подобного превышения, так как не давал роста производительности. Однако этот вариант также необходимо рассмотреть для наглядности.

Первый этап эксперимента предполагал вычисление на стандартном наборе данных (табл. 1) с варьируемым количеством логических потоков. Для «чистоты эксперимента» при расчете количество наземных роботов взято равным нулю. С учетом принципа работы менеджера потоков, количество задач в пакете должно быть большим либо равным количеству потоков. В противном случае часть логических потоков не будет задействована и общая производительностькратно упадет.

Таблица 1 – Параметры эксперимента 1

Параметр или константа	Значение
Размер карты, точек*точек	258x258
Число летающих роботов, шт.	64
Число наземных роботов, шт.	0
Длина пути, точек	100
Количество логических потоков, шт.	8:2:20
Количество задач в пакете, шт.	20
Количество физических потоков, шт.	8(16 w/ Hyper-Threading)

Согласно полученным результатам, наименьшее время выполнения получено при наименьшем количестве потоков, что обуславливается совпадением заданного числа с количеством логических ядер процессора. При этом, если увеличивать количество логических потоков, то общая загрузка ЦП не изменяется, но при этом добавляются временные затраты на системные прерывания и функционирование дополнительных логических потоков менеджера. Зависимости числа и времени вычисления пакетов от числа потоков приведены на рисунках 1 и 2, соответственно.

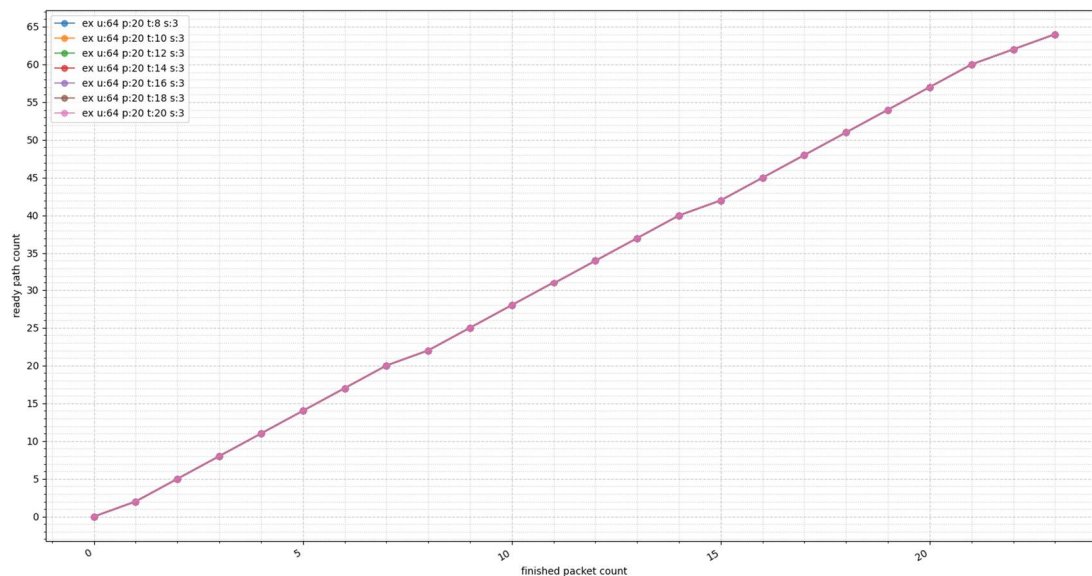


Рисунок 1 – Количество вычисленных пакетов для переменного количества потоков

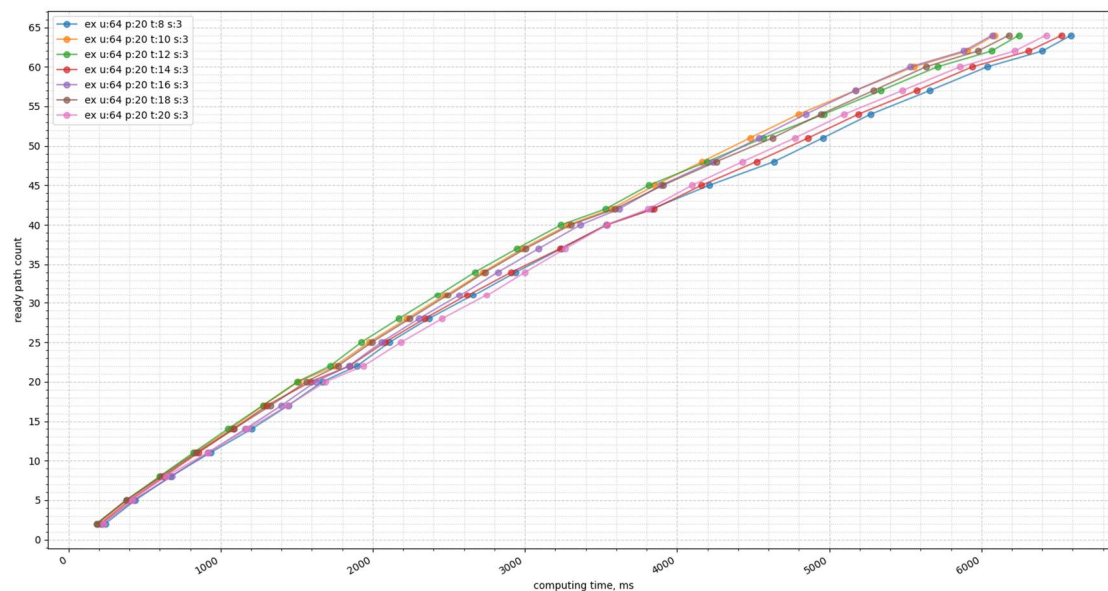


Рисунок 2 – Время расчета для переменного количества потоков

Второй этап заключается в рассмотрении времени вычисления для ограниченного количества логических потоков, которое меньше, чем количество физических потоков доступных ОС (табл. 2). Основной смысл заключается в проверке гипотезы о субоптимальном количестве логических потоков, равном количеству «честных» или физических ядер ЦП. Возможно, технология Hyper-Threading оказывает негативное влияние на однотипные математически операции.

Таблица 2 – Параметры эксперимента 2

Параметр или константа	Значение
Размер карты, точек*точек	258x258
Число летающих роботов, шт.	64
Число наземных роботов, шт.	0
Длина пути, точек	100
Количество логических потоков, шт.	2:2:8
Количество задач в пакете, шт.	8
Количество физических потоков, шт.	8(16 w/ Hyper-Threading)

Согласно полученным результатам, наихудшее время вычисления получается, когда потоков слишком мало. Однако нас в большей степени интересует другие два графика, которые показывают, что при использовании количества логических потоков, равным количеству логических ядер получаем преимущество по времени вычисления. При этом в отличие от экспериментов в предыдущей части исследования [2] выигрыш по времени составляет значительно меньше, чем два раза, так как для данного эксперимента считаем время готовности к движению, а не время математического расчета. Зависимости числа и времени вычисления пакетов для переменного числа потоков приведены на рисунках 3 и 4, соответственно.

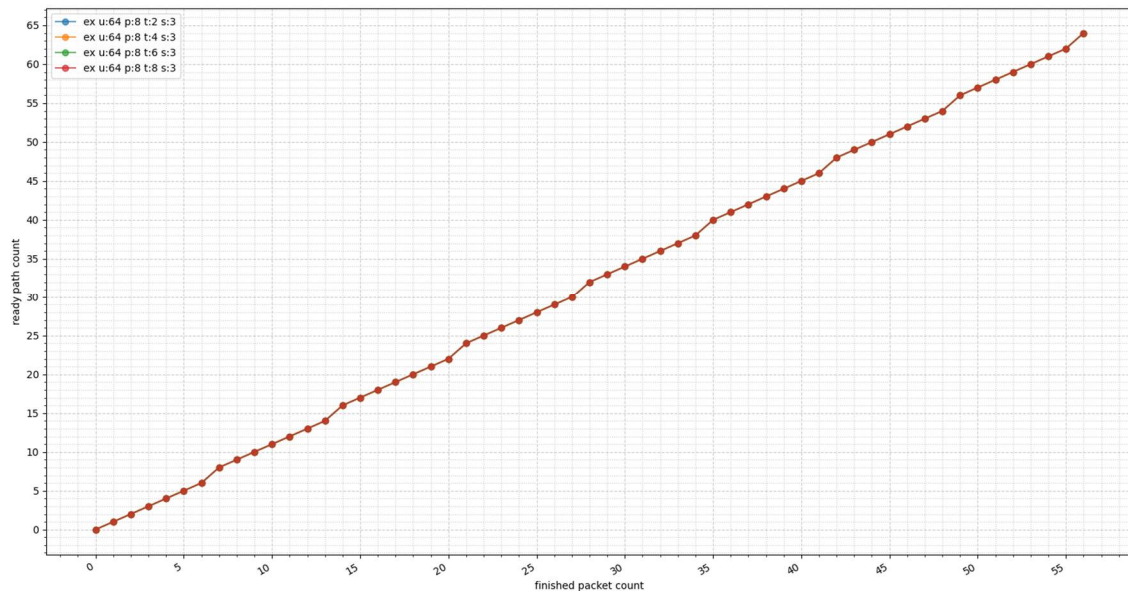


Рисунок 3 – Количество вычисленных пакетов для переменного количества потоков

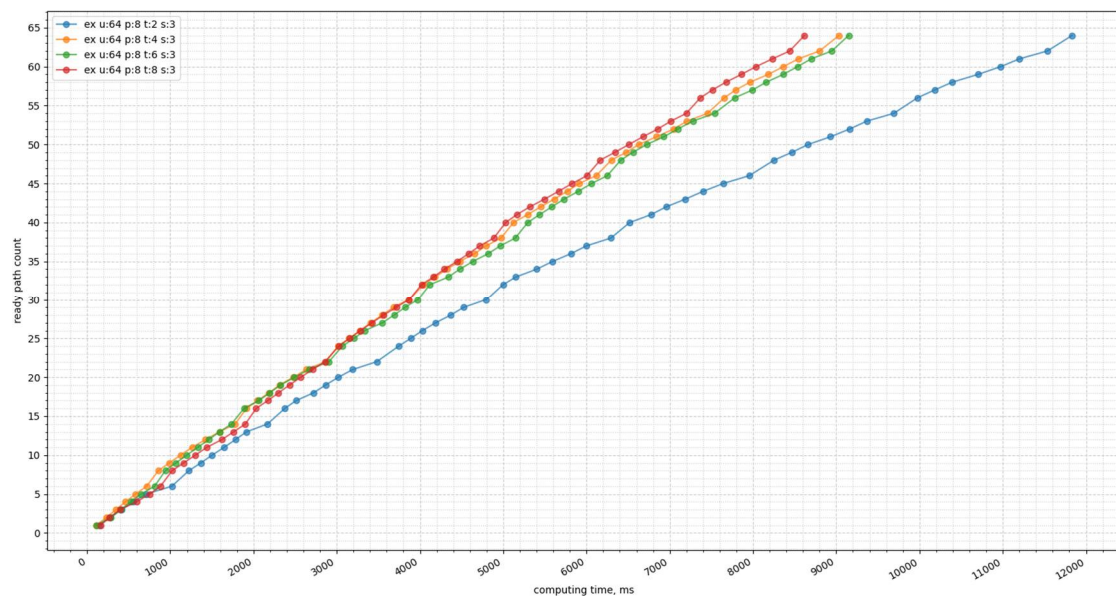


Рисунок 4 – Время расчета для переменного количества потоков

Зафиксируем субоптимальное значение количества логических потоков и рассмотрим варьируемое количество задач в пакете (табл. 3). Диапазон значений на данном этапе содержит как меньшее, так и большее количество задач относительно количества потоков.

Таблица 3 – Параметры эксперимента 3

Параметр или константа	Значение
Размер карты, точек*точек	258x258
Число летающих роботов, шт.	64
Число наземных роботов, шт.	0
Длина пути, точек	100
Количество логических потоков, шт.	8
Количество задач в пакете, шт.	2:2:16
Количество физических потоков, шт.	8(16 w/ Hyper-Threading)

В отличие от предыдущих этапов заметно различие в количестве рассчитанных пакетов на один готовый путь. Наиболее быстрый вариант расчета предполагает использование пакета максимального объема. Вначале имелось предположение, что в некоторых случаях возможна перегрузка менеджера потоков из-за большого количества задач в пакете. Однако на практике такой случай, если и возможен, то не в нашей области применения. Поэтому исследовать этот момент лучше в контексте нескольких задач различных предметных областей. Зависимости числа и времени вычисления пакетов для переменного числа задач приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

Рассмотрим далее влияние количества разбиений на полное время готовности пути (табл. 4). В текущем контексте разбиениекратно увеличивает количество подзадач поиска пути, но сокращает ожидаемую длину пути, а значит и время расчета каждого конкретного участка.

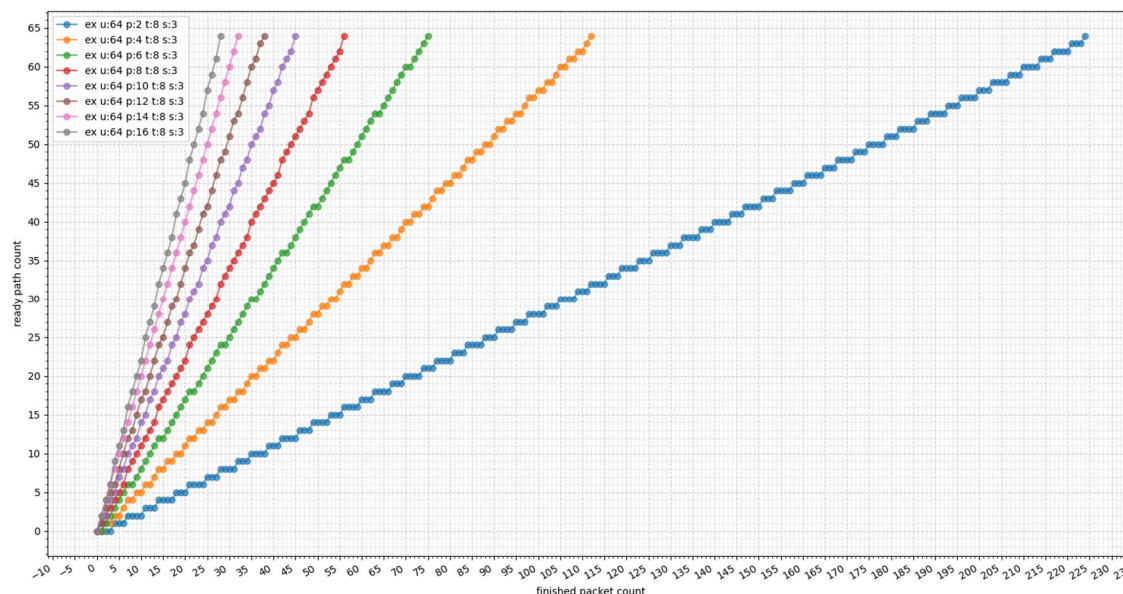


Рисунок 5 – Количество вычисленных пакетов для переменного количества задач

Таблица 4 – Параметры эксперимента 4

Параметр или константа	Значение
Размер карты, точек*точек	258x258
Число летающих роботов, шт.	64
Число наземных роботов, шт.	0
Длина пути, точек	100
Количество логических потоков, шт.	8
Количество задач в пакете, шт.	8
Количество физических потоков, шт.	8(16 w/ Hyper-Threading)
Количество разбиений пути, шт.	0:1:8

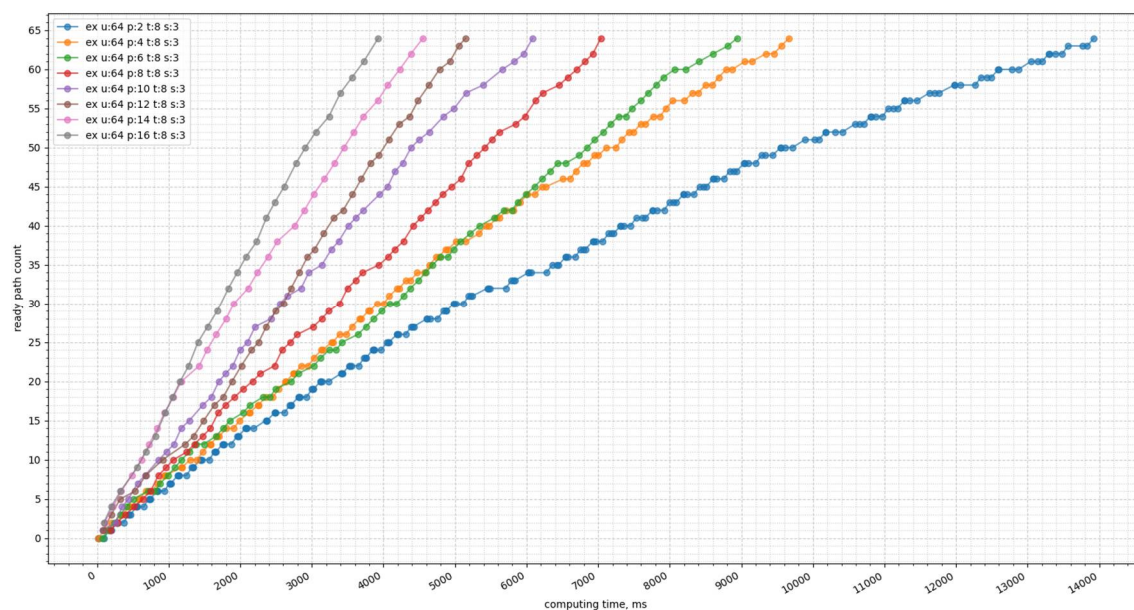


Рисунок 6 – Время расчета для переменного количества задач

Еще при рассмотрении стратегий обследования местности возник вопрос о количестве разбиений искомого пути летающих роботов. В соответствии с исходной постановкой задачи для каждого дрона может быть установлено любое количество контрольных точек. При этом в случае расчета на малых участках уменьшается размер матрицы покрытия для метода Ли, что предполагает уменьшение времени расчета. Однако согласно полученным результатам, наименьшее время расчета достигнуто при отсутствии разбиений. Следует заметить, что эксперимент проводился на модельной карте без препятствий и полученный результат по времени имеет сравнимый порядок. Следовательно, на реальных данных возможны более сложные случаи, и выбор субоптимального количества разбиений вариативен в зависимости от локации. Также для создания покрытия местности дронами с некоторым радиусом обзора маршрут должен иметь контрольные точки. Таким образом, субоптимальным количеством разбиений является минимально необходимое для выбранной стратегией исследования местности. Зависимости числа и времени вычисления пакетов при различном размере разбиений приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

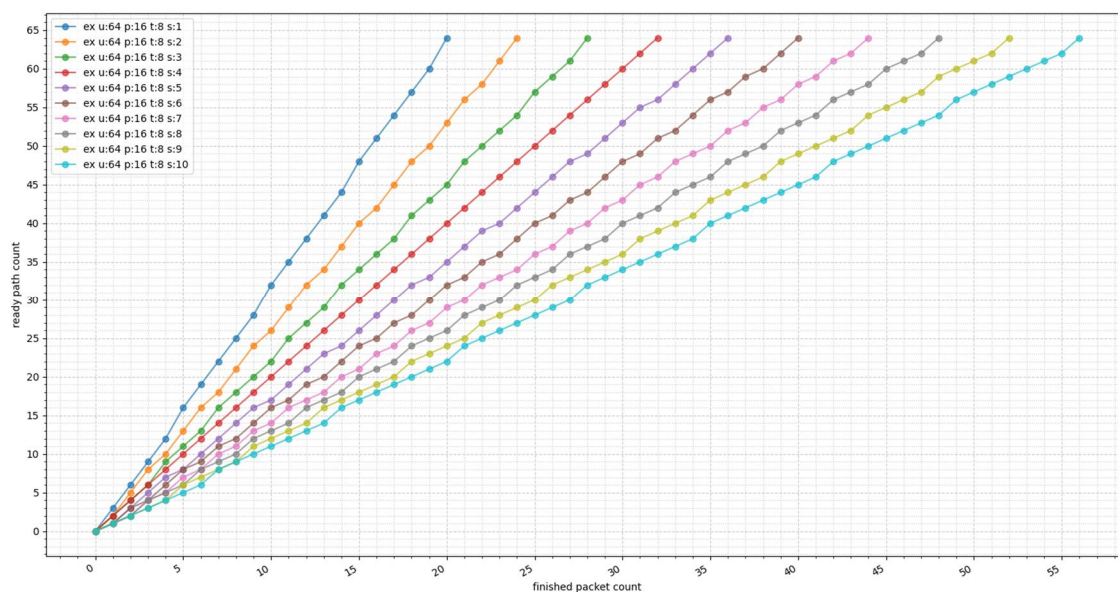


Рисунок 7 – Количество вычисленных пакетов для переменного количества разбиений

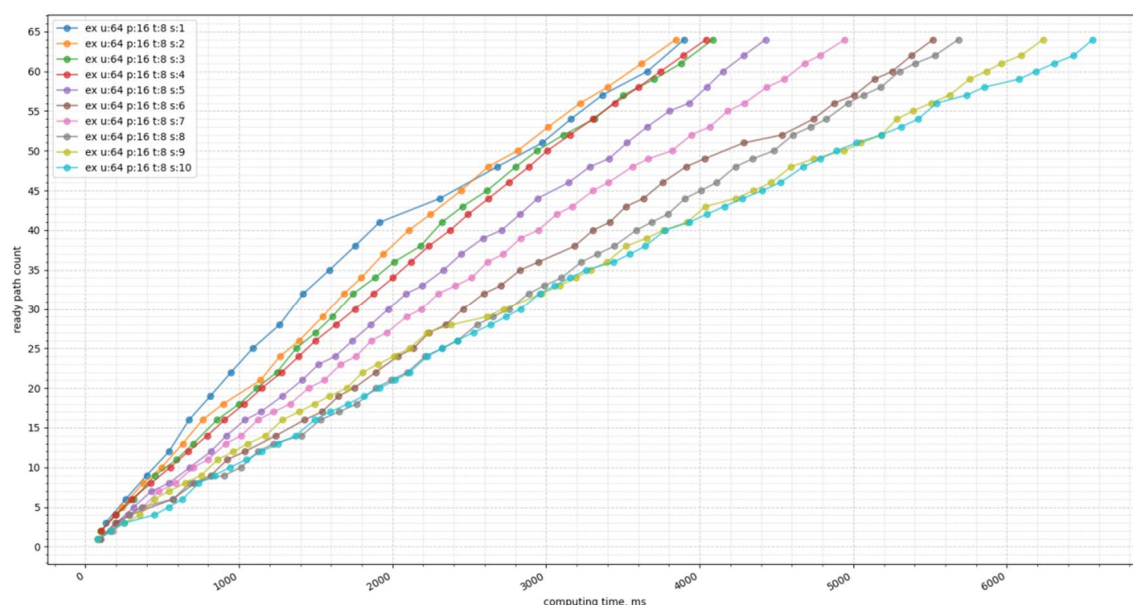


Рисунок 8 – Время расчета для переменного количества разбиений

Заключение. В соответствии с результатами проведенных экспериментов предложена методика конфигурации параметров для менеджера потоков с целью получения субоптимальных параметров, позволяющих как можно раньше запустить дроны для исследования местности. Эта конфигурация ориентирована исключительно на практическое применение, так как отвечает на вопрос «что сделать, чтобы запустить дронов как можно быстрее». В контексте общего исследования результат является смежным между статической и динамической моделью, что позволит в дальнейшем перейти к коррекции путей «на лету» в изменяющихся внешних условиях с готовым механизмом параллелизации.

Также необходимо заметить, что исходный код менеджера потоков возможно дополнить модулем конфигурации и сделать полностью отчуждаемым, т.е. независимым от задачи. Подобная конструкция представляет самооптимизирующееся решение «из коробки» и позволит свести к минимуму время внедрения в сторонние программные комплексы.

Библиографический список

1. Попов, С. Г. Исследование алгоритма обследования местности гетерогенной группой автономных мобильных роботов / С. Г. Попов, А. С. Крашенинников, М. В. Чуватов // Робототехника и техническая кибернетика. – Санкт-Петербург : ЦНИИ РТК, 2019. – Т. 7, № 4. – С. 278–290.
2. Попов, С. Г. Исследование алгоритма многопоточного поиска путей гетерогенной группы автономных мобильных роботов / С. Г. Попов, А. С. Крашенинников, А. С. Тучков, А. И. Осадчий // Информация и космос. – 2020. – № 4. – С. 57–65.
3. Пашенко, Д. В. Многопоточность как фактор, влияющий на быстродействие и производительность параллельной вычислительной системы при выполнении операций сортировки данных / Д. В. Пашенко, А. И. Мартышкин, А. Н. Перекусихина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – Т. 8, № 3. – С. 23–29.
4. Койбаш, А. А. Модификация алгоритма A* для прогнозирования траектории движения подвижного объекта в распределенных вычислительных системах / А. А. Койбаш, Т. В. Завадская, С. В. Кривошеев // Проблемы искусственного интеллекта. – 2018. – № 3 (10).
5. Подвальный, С. Л. Разработка специального программного обеспечения решения транспортных задач модифицированным генетическим алгоритмом с использованием многопоточности / С. Л. Подвальный, Д. А. Вдовин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, № 4.
6. Зюбин, В. Е. Распределение вычислительных ресурсов в средах с многопоточной реализацией гиперавтомата / В. Е. Зюбин, А. Д. Петухов // Идентификация систем и задачи управления : материалы III Междунар. конф. SICPRO. – 2004. – Т. 4. – С. 446–463.
7. Дергачев, С. А. Об одном вопросе реализации алгоритма планирования траектории A / С. А. Дергачев, К. С. Яковлев // Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2019) : Пятый Всероссийский научно-практический семинар. – 2019. – С. 66–76.
8. Лавренов, Р. О. Планирование маршрута для беспилотного наземного робота с учетом множества критериев оптимизации / Р. О. Лавренов, И. М. Афанасьев, Е. А. Магид // Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта. – 2016. – С. 10–20.

9. Дивеев, А. И. Эволюционные методы вычислений для синтеза управления группой роботов и поиска оптимальных траекторий их движения / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // *Cloud of science*. – 2017. – Т. 4, № 3.
10. Зенкевич, С. Л. Управление группой мобильных роботов с помощью сопровождающего дрона / С. Л. Зенкевич, А. В. Назарова, Х. Цзяньвень // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 208–214.
11. Даринцев, О. В. Декомпозиция задач в группе роботов с использованием технологий облачных вычислений / О. В. Даринцев, А. Б. Мигранов // *Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН*. – 2017. – Т. 12, № 1. – С. 83–88.
12. Агафонов, А. А. Исследование эффективности вычисления надежного кратчайшего пути с использованием GPU / А. А. Агафонов, А. И. Максимов, А. А. Бородин // *Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020)*. – 2020. – С. 732–738.
13. Янчин, И. А. Параллелизация генетических алгоритмов при поиске пути / И. А. Янчин, О. Н. Петров // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина)»*, 2016. – Т. 1, № 1–3. – С. 520–523.
14. Tullsen, D. M. Simultaneous multithreading: Maximizing on-chip parallelism / D. M., Tullsen, S. J. Eggers, H. M. Levy // *Proceedings of the 22nd annual international symposium on Computer architecture*. – 1995. – P. 392–403.
15. Roth, A. Speculative data-driven multithreading / A. Roth, G. S. Sohi // *Proceedings HPCA Seventh International Symposium on High-Performance Computer Architecture*. – IEEE, 2001. – P. 37–48.
16. Kim, H. Multithreading optimization techniques for sensor network operating systems / H. Kim, H. Cha // *European Conference on Wireless Sensor Networks*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 293–308.
17. Kuorilehto, M. Sensors: A new operating system for time critical wsn applications / M. Kuorilehto et al. // *International Workshop on Embedded Computer Systems*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 431–442.
18. Liu, Z. A Dynamic Fusion Pathfinding Algorithm Using Delaunay Triangulation and Improved A-Star for Mobile Robots / Z. Liu et al. // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 20602–20621.
19. Chudý, J. Emulating Centralized Control in Multi-Agent Pathfinding Using Decentralized Swarm of Reflex-Based Robots / J. Chudý, N. Popov, P. Surynek // *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. – IEEE, 2020. – P. 3998–4005.
20. Abiyev, R. H. et al. Robot pathfinding using vision based obstacle detection / R. H. Abiyev et al. // *2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF)*. – IEEE, 2017. – P. 1–6.
21. Liu Y., Chen M., Huang H. Multi-agent Pathfinding Based on Improved Cooperative A* in Kiva System // *2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. – IEEE, 2019. – P. 633–638.

References

1. Popov, S. G., Krashennnikov, A. S., Chuvatov, M. V. Issledovaniye algoritma obsledovaniya mestnosti geterogennoy gruppy avtonomnykh mobilnykh robotov [The study of the survey algorithm of the heterogeneous group of autonomous mobile robots]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics]. Saint Petersburg, TsNII RTK, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 278–290.
2. Popov, S. G., Krashennnikov, A. S., Tuchkov, A. S., Osadchuy, A. I. Issledovanie algoritma mnogopotchnogo poiska putey geterogennoy gruppy avtonomnykh mobilnykh robotov [Study of the algorithm for multi-thread path search of a heterogeneous group of autonomous mobile robots]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space], 2020, № 4, pp. 57–65.
3. Paschenko, D. V., Martushkin, A. I., Perekusikhina, A. N. Mnogopotchnost kak faktor, vliyayushchiy na bystrodeystviye i proizvoditelnost parallelnoy vychislitelnoy sistemy pri vypolnenii operatsiy sortirovki dannykh [Multi-threading as a factor affecting the speed and performance of a parallel computing system when performing data sorting operations]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plus* [XXI century: The results of the past and the problems of the present plus], 2019, vol. 8, no. 3, pp. 23–29.
4. Koybash, A. A., Zavadskaya, T. V., Krivosheev, S. V. Modifikatsiya algoritma A* dlya prognozirovaniya trayektorii dvizheniya podvizhnogo obyekt v raspredelennykh vychislitelnykh sistemakh [Modification of the A* algorithm for predicting the trajectory of a moving object in distributed computing system]. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [AI Problems], 2018, vol. 3 (10).
5. Podvalny, S. L., Vdovin, D. A. Razrabotka spetsialnogo programmnoy obespecheniya resheniya transportnykh zadach modifitsirovannym geneticheskim algoritmom s ispolzovaniem mnogopotchnosti [Development of special software for solving transportation problems with a modified genetic algorithm using multi-threading]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2020, vol. 16, no. 4.
6. Zyubin, V. E., Petukhov, A. D. Raspredeleniye vychislitelnykh resursov v sredakh s mnogopotchnoy realizatsiyey giperavtomata [Distribution of computing resources in environments with multi-threaded implementation of a hyperautomat]. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya : materialy III Mezhdunarodnoy konferentsii SICPRO* [System identification and control tasks : proceedings of the III International conference SICPRO], 2004, vol. 4, pp. 446–463.
7. Dergachev, S. A., Yakovlev, K. S. Ob odnom voprose realizatsii algoritma planirovaniya trayektorii A* [On one issue of the implementation of the trajectory planning algorithm A*]. *Bespilotnyye transportnyye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta : Pyatyy Vserossiyskiy nauchno-prakticheskiy seminar (BTS-AI-2019)* [Unmanned Vehicles with Artificial Intelligence Elements Fifth All-Russian Scientific and Practical Seminar], 2019, pp. 66–76.

8. Lavrenov, R. O., Afanasev, I. M., Magid, E. A. Planirovaniye marshruta dlya bespilotnogo nazemnogo robota s uchetom mnozhestva kriteriyev optimizatsii [Route planning for an unmanned ground robot taking into account a variety of optimization criteria]. *Bespilotnyye transportnyye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta* [Unmanned vehicles with artificial intelligence elements], 2016, pp. 10–20.
9. Diveev, A. I., Shamlko, E. U., Evolyutsionnyye metody vychisleniy dlya sinteza upravleniya gruppoy robotov i poiska optimalnykh trayektoriy ikh dvizheniya [Evolutionary computational methods for the synthesis of control of a group of robots and the search for optimal trajectories of their movement]. *Cloud of science*, 2017, vol. 4, no. 3.
10. Zenkevich, S. L., Nazarova, A. V., Jianwen, H., Tszyanven, Kh. Upravleniye gruppoy mobilnykh robotov s pomoshchyu soprovozhdayushchego drona [Controlling a group of mobile robots using an escort drone]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2019, vol. 7, no. 3, pp. 208–214.
11. Darintsev, O. V., Migranov, A. B. Dekompozitsiya zadach v gruppe robotov s ispolzovaniyem tekhnologiy oblachnykh vychisleniy [Decomposition of tasks in a group of robots using cloud computing technologies]. *Trudy Instituta mekhaniki im. RR Mavlyutova UNTs RAN* [Proceedings of the Institute of Mechanics. RR Mavlyutova UC RAS], 2017, vol. 12, no. 1, pp. 83–88.
12. Agafonov, A. A., Maksimov, A. I., Borodinov, A. A. Issledovaniye effektivnosti vychisleniya nadezhnogo krachayshego puti s ispolzovaniye GPU [Investigation the Efficiency of Computing a Reliable Shortest Path Using a GPU]. *Informatsionnyye tekhnologii i nanotekhnologii IITHT-2020* [Information technology and nanotechnology (IITHT-2020)], 2020, pp. 732–738.
13. Yanchin, I. A., Petrov, O. N. Parallelizatsiya geneticheskikh algoritmov pri poiske puti [Parallelization of genetic algorithms in pathfinding]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam. Federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskii universitet LETI im. VI Ulyanova (Lenina)"* [International Conference on Soft Computing and Measurements. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "V.I. Ulyanov (Lenin) Saint-Petersburg State Electrotechnical University LETI"], 2016, vol. 1, no. 1–3, pp. 520–523.
14. Tullsen, D. M., Eggers, S. J., Levy, H. M. Simultaneous multithreading: Maximizing on-chip parallelism. *Proceedings of the 22nd annual international symposium on Computer architecture*, 1995, pp. 392–403.
15. Roth, A., Sohi, G. S. Speculative data-driven multithreading. *Proceedings HPCA Seventh International Symposium on High-Performance Computer Architecture*. IEEE, 2001, pp. 37–48.
16. Kim, H., Cha, H. Multithreading optimization techniques for sensor network operating systems. *European Conference on Wireless Sensor Networks*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 293–308.
17. Kuorilehto, M. et al. Sensoros: A new operating system for time critical wsn applications. *International Workshop on Embedded Computer Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 431–442.
18. Liu, Z. et al. A Dynamic Fusion Pathfinding Algorithm Using Delaunay Triangulation and Improved A-Star for Mobile Robots. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 20602–20621.
19. Chudý, J., Popov, N., Surynek, P. Emulating Centralized Control in Multi-Agent Pathfinding Using Decentralized Swarm of Reflex-Based Robots. *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, 2020, pp. 3998–4005.
20. Abiyev, R. H. et al. Robot pathfinding using vision based obstacle detection. *2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
21. Liu, Y., Chen, M., Huang, H. Multi-agent Pathfinding Based on Improved Cooperative A* in Kiva System. *2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. IEEE, 2019, pp. 633–638.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале публикуются материалы на английском и русском языках по тематике, соответствующей утвержденным для журнала отраслям наук, группам специальностей.

2. В список соавторов работ включаются только те лица, которые внесли творческий вклад в подготовку представленных материалов. Лицам, оказавшим только техническую помощь, можно выразить благодарность в конце статьи. Один человек может быть автором (соавтором) не более чем двух статей в одном номере журнала, причем единственным автором он может быть только в одной статье.

3. Объем публикаций для научных статей должен быть не менее 8 страниц, а количество источников в библиографическом списке (списке литературы) – не менее 10 позиций.

4. **Содержание** каждой статьи должно включать следующие элементы: УДК; название статьи; сведения об авторах, включая их место работы, должность, адрес электронной почты; аннотацию объемом от 100 до 250 слов, ключевые слова (от 9 до 13); графическую аннотацию, отражающую содержание статьи; название статьи, сведения об авторах, аннотацию и ключевые слова на английском языке (для англоязычных статей – на русском языке); введение – оно должно заканчиваться формулировкой цели работы в явной форме; собственно текст статьи – очень желательна его сегментация на разделы, имеющие содержательные заголовки; выводы или заключение (должны соответствовать формулировке цели статьи).

5. Для русскоязычных статей приводится два библиографических списка: на языке оригинала статьи; список с транслитерацией русскоязычных источников на латиницу и (дополнительно) приведением в квадратных скобках переводов названий статей и названий источников на английский язык.

В «русскоязычном» библиографическом списке (списке литературы) порядок следования источников – по алфавиту фамилий авторов (сначала русскоязычные источники, потом иноязычные). На все источники, включенные в библиографический список, должны быть даны ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. При необходимости авторы могут указывать номера страниц в источниках, на которые даются ссылки. Приветствуются ссылки на иноязычные источники, а также на материалы, опубликованные ранее в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии». Однако в последнем случае количество таких ссылок не должно превышать 20 % от общего количества источников, включенных в библиографический список. Для источников, имеющих DOI, целесообразно его указывать. При ссылках на статьи, опубликованные в журнале «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии», целесообразно в конце библиографического описания источника в круглых скобках указывать гиперссылку, указывающую на место размещения статьи на страничке сайта Астраханского государственного университета.

Ссылки в библиографическом списке на материалы, размещенные в интернете, допускаются при соблюдении следующих условий: если у материала, на который дается ссылка, имеется автор и/или название, то они должны быть указаны для этого источника; должен быть приведен полный маршрут доступа к источнику в интернете; должна быть указана дата обращения (доступа) к источнику.

Ограничения по списку литературы: доля самоцитирований для любого из авторов статьи, а также по совокупности всех авторов статьи, не должна превышать 25 %; доля ссылок на статьи с участием одного автора, не являющегося автором (соавтором) статьи, не должна превышать 25 %.

6. Суммарная доля таблиц и иллюстраций в общем объеме представляемой статьи не должна превышать 40 %. Под иллюстрациями понимаются следующие объекты: диаграммы; графики; рисунки; эскизы; фотографии; карты и т.п.

7. Доля оригинального текста в статьях (оцениваемого через систему «Антиплагиат» на сайте www.antiplagiat.ru) должна быть не менее 80 %.

8. Указание на то, что работа финансируется по какому-либо гранту, в рамках Федеральной целевой программы, государственного заказа и пр. дается в виде постраничной сноски после заголовка (названия) работы.

9. В сведения об авторах работ помимо места работы и должности целесообразно включать ORCID автора и гиперссылку на страничку с его личными наукометрическими показателями на сайте www.elibrary.ru. По желанию можно привести также ссылки на странички с наукометрическими показателями на Scopus, в ResearchGate; на личную страничку, размещенную на сайте организации.

10. Основные технические требования к оформлению статей (материалов):

10.1. Текст должен быть расположен по ширине страницы формата А4 с учётом полей (все поля по 2,5 см), набран шрифтом Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал 1,0. В таблицах, подписочных надписях допускается уменьшенный шрифт – вплоть до 10 кегля. Альбомная ориентация страниц допускается **только в порядке исключения** для следующих случаев: широкоформатные таблицы с большим количеством колонок; иллюстрации большого размера, которые не уместятся на странице с книжной ориентацией.

Абзацные отступы одинаковы по всему тексту – 1,25 см. Кавычки («»), скобки ([], ()), маркеры и другие знаки должны быть аналогичными на протяжении всего предоставляемого для публикации материала.

10.2. Все таблицы, рисунки, формулы должны иметь сквозную нумерацию в пределах текста статьи. Заголовки таблиц пишутся над ними и должны включать в себя номер таблицы и ее содержательное наименование.

10.3 Формулы должны иметь сквозную нумерацию в пределах текста статьи. Для формул желательно избегать «многоэтажных конструкций». Нумероваться могут только те формулы, на которые есть ссылки в статье. Размеры шрифтов для формул в MS Equation Editor: основные символы – 14 пт.; подстрочные и надстрочные индексы – 10 пт.; дополнительные индексы для подстрочных и надстрочных индексов – 8 пунктов. Константы в формулах записываются прямым шрифтом, переменные – курсивом (наклонным шрифтом); векторные и матричные величины – полужирным шрифтом. Матричные величины могут указываться в квадратных скобках, векторные величины (наборы скаляров) – в фигурных скобках.

Дополнительная информация для авторов статей

Основная тематика журнала и требования к научному уровню представляемых статей – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/trebovaniya.pdf>.

Адрес и телефоны редакционно-издательского дома – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/address.pdf>.

Пример оформления текста статьи – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/primer.pdf>.

Рекомендации по оформлению графических аннотаций – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/graf_ann.pdf, дополнительных материалов к статьям – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/dop_mat.pdf.

Подробные правила оформления таблиц – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/tables.pdf>, оформления формул – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/formul.pdf>, оформления иллюстраций – <http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/ilustr.pdf>.

Пример оформления основного списка литературы к статье – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/spisok_liter.pdf, транслитерированного списка – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/trasn_spisok_liter.pdf.

Дополнительные документы к статьям, представляемые авторами – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/dop_doc.pdf.

Переписка с авторами и порядок рецензирования статей – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/poryadok_recenz.pdf.

Условия и порядок оплаты статей – http://hi-tech.asu.edu.ru/docs/ru-rules/poryadok_oplaty.pdf.

**Подписка на наши издания осуществляется
по Объединённому каталогу «Пресса России»**

Журнал фундаментальных и прикладных исследований «Гуманитарные исследования»

Подписной индекс – 11109

В журнале публикуются статьи по широкому спектру проблем гуманитарного знания. Ведущие направления публикаций отражены в следующих рубриках: «Языкознание», «Литературоведение».

Периодичность издания – 4 раза в год.

Ориентировочная стоимость одного номера – 3762 руб.

Телефон: (8512) 24-64-95. E-mail: asupress@yandex.ru

Научно-технический журнал «Геология, география и глобальная энергия»

Подписной индекс – 11173

Редколлегия журнала принимает к рассмотрению статьи по проблемам геологии, нефтегазоносности различных регионов, охватывающие важнейшие и крайне полезные для науки и производства, а также для обучения студентов естественного направления.

Периодичность издания – 4 раза в год.

Ориентировочная стоимость одного номера – 4500 руб.

Телефон: (8512) 24-64-95. E-mail: asupress@yandex.ru

Научный журнал «Каспийский регион: политика, экономика, культура»

Подписной индекс – 11170

Профиль журнала – анализ проблем настоящего, прошлого и будущего Каспийского региона в их взаимосвязи с современным развитием мира.

Издание имеет многоплановый, междисциплинарный характер, знакомит читателя с исследованиями и дискуссиями во всех областях социальных и гуманитарных знаний по проблемам Каспийского региона.

Периодичность издания – 4 раза в год.

Ориентировочная стоимость одного номера – 3500 руб.

Телефон: (8512) 24-64-95. E-mail: asupress@yandex.ru

Научно-технический журнал «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии»

Подписной индекс – 73313

На страницах журнала представлены результаты исследований и новейшие разработки в области технических наук.

Ведущие направления публикаций отражены в следующих рубриках: «Управление в социальных и экономических системах», «Системный анализ, управление и обработка информации», «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», «Информационная безопасность и защита информации», «Информационно-измерительные и управляющие системы».

Периодичность издания – 4 раза в год.

Ориентировочная стоимость одного номера – 9000 руб.

Телефон: (8512) 24-64-95. E-mail: asupress@yandex.ru

Предлагаем всем желающим разместить в наших изданиях рекламу.
Адрес Издательского дома «Астраханский университет»:
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а; тел. (8512) 24-64-95, 24-68-37
e-mail: asupress@yandex.ru

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**2021
№ 3 (55)**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Федеральной службы по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия
ПИ № ФС77-31932 от 16 мая 2008 г.

Учредитель
Астраханский государственный университет
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Адрес редакции:
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20

Адрес издателя:
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а

Подписной индекс – 73313
По Объединенному каталогу «Пресса России»

Главный редактор И.М. Ажмухамедов

Техническое редактирование,
компьютерная правка, верстка *Н.Н. Сахно*

Дата выхода в свет 25.10.2021 г.

Цена свободная
Уч.-изд. 9,0. Усл. печ. л. 12,1.
Заказ № 4363. Тираж 500 экз. (первый завод – 22 экз.)

Оттиражировано на базе Издательского дома «Астраханский университет»
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а
Тел. (8512) 24-64-95, тел./факс (8512) 24-68-37
E-mail: asupress@yandex.ru