

ДОКЛАДЫ БГУИР

Том 23, № 5, 2025

Научный журнал выходит шесть раз в год

Учредитель

Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Журнал включен в Перечень ВАК Республики Беларусь, а также в базы данных:
CNKI, Dimensions, DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, НЭБ «КиберЛенинка», РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

Цаладонов А. Д., Ревенько Д. В., Биран С. А., Короткевич А. В., Новиков П. Э., Корсак К. В. Вертикальные токопроводящие переходы в диэлектрических подложках на основе анодного оксида алюминия	5
Гога А. В., Ронищенко Б. В. Моделирование оптического биосенсора на основе анодных наноструктурированных оксидов ниобия и тантала	12
Купо А. Н. Лазерно-активированные фотохимические процессы формирования тонкопленочных систем микроэлектроники	20
Хорошко В. В., Осмоловская Т. Н., Станчик А. В., Пугач Н. Г., Дорошкевич А. С., Радюш Ю. В., Кузьмар И. И., Лоско Е. В. Полупроводниковые твердые растворы $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: синтез, структурные свойства, диаграмма состояния	27
Мордачев В. И., Ционенко Д. А. Суммарные уровни антропогенного и естественного электромагнитного фона СВЧ на территориях с интенсивным информационным обслуживанием созвездиями низкоорбитальных спутников связи.....	35
Липкович Э. Б., Беленкевич Н. И., Зорько М. И. Методика расчета энергетической эффективности систем связи и вещания с помехоустойчивым блочным кодированием и многопозиционной модуляцией	45
Ходяков И. В., Макарец И. О. Компьютерное моделирование деформации кварцевой двояковыпуклой линзы при вакуумном креплении в интерферометре	53
Апочкина Е. Ф., Прокофьева Т. В., Апорович В. А. Распознавание типов баллистических ракет с помощью нейронных сетей по траекторной информации.....	58
Лукашевич М. М., Клицунова Е. Экспериментальные исследования по применению методов балансировки данных в задачах классификации	66
Кайки М. Н., Иванюк А. А. Управление метастабильным состоянием элемента памяти с целью генерации случайных данных	75
Баглов А. В., Хорошко Л. С. Кросс-платформенный анализатор зонной структуры материалов для пакета квантово-механического моделирования OpenMX.....	83
Уласовец К. И., Чуйко В. А., Козлова Е. И. Мобильное приложение для генерации изображений помещения с использованием модели Stable Diffusion	93
Мацкевич В. В., Го Ц. Адаптация нейросетевого классификатора к неустойчивым входным данным	99

**Главный редактор
Вадим Анатольевич Богуш,**

д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Редакционная коллегия

Лыньков Л. М., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – заместитель главного редактора

Стемпницкий В. Р., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – заместитель главного редактора

Бойправ О. В., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – ответственный секретарь редколлегии

Батура М. П., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Борисенко В. Е., д. ф.-м. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Гасанов М. Г., д. т. н., профессор, Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Козлов С. В., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Лабуню В. А., акад. НАН Беларуси, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Писецкий Ю. В., д. т. н., доцент, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми, Ташкент, Узбекистан

Сигов А. С., акад. РАН, д. ф.-м. н., профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Смирнов А. Г., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Татур М. М., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Цветков В. Ю., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь, рег. номер 1087

Журнал издается с 2003 г. Дата последней перерегистрации 23 января 2010 г.

Индекс для индивидуальной подписки 00787, для ведомственной – 007872.

Подписано в печать 15.10.2025. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 75 экз. Заказ 185.

Адрес редакции:
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, ком. 329а
Тел.: +375 17 293-88-41
doklady@bsuir.by; <http://doklady.bsuir.by>

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 24.12.2020.
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

DOKLADY BGUIR

V. 23, No 5, 2025

The scientific journal is published 6 times a year

Founder

Educational Establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics"

The Journal is included in the List of Scientific Editions in the Republic of Belarus,
as well as the following databases:

CNKI, Dimensions, DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, CyberLeninka, RSCI

CONTENTS

Tsaladonov A. D., Revenko D. V., Biran S. A., Korotkevich A. V., Novikov P. E., Korsak K. V. Vertical Conductive Transitions in Dielectric Substrates Based on Anodic Aluminum Oxide	5
Hoha A. V., Ranishenka B. V. Simulation of Optical Biosensor Based on Anodic Nanostructured Niobium and Tantalum Oxides	12
Kupo A. Laser-Activated Photochemical Processes of Formation of Thin-Film Systems of Microelectronics	20
Khoroshko V. V., Osmolovskaya T. N., Stanchik A. V., Pugach N. G., Doroshkevich A. S., Radyush Y. V., Kuzmar I. I., Loska A. U. Semiconductor Solid Solutions $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: Synthesis, Structural Properties, State Diagram	27
Mordachev V. I., Tsyantenka D. A. Total Levels of Anthropogenic and Natural Microwave Electromagnetic Background in Areas with Intensive Information Servicing by Constellations of Low-Orbit Communication Satellites.....	35
Lipkovich E. B., Belenkevich N. I., Zorka M. I. Methodology for Calculating the Energy Efficiency of Communication and Broadcasting Systems with Noise-Immune Block Coding and Multi-Position Modulation.....	45
Khadziakou I. V., Makartsou I. O. Computer-Based Simulation of Deformation of a Quartz Biconvex Lens During Vacuum Mounting in an Interferometer	53
Apochkina A. F., Prokofieva T. V., Aparovich U. A. Recognition of Ballistic Missile Types Using Neural Networks Based on Trajectory Information.....	58
Lukashevich M. M., Klitsunova K. Experimental Studies on the Application of Data Balancing Methods in Classification Problems.....	66
Kaiky M. N., Ivaniuk A. A. Control of the Metastable State of a Memory Element for the Purpose of Random Data Generation	75
Baglov A. V., Khoroshko L. S. Cross-Platform Material Band Structure Analyzer for the OpenMX Quantum Mechanical Modeling Package	83
Ulasavets K. I., Chuyko V. A., Kazlova A. I. Mobile Application for Generating Room Images Using Stable Diffusion Model	93
Matskevich V. V., Guo J. Neural Network Classifier Adaptation to Unstable Input Data	99

Editor-in-Chief

Vadim A. Bogush, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor,
Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Editorial Board

Leonid M. Lynkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Deputy Editor-in-Chief

Viktor R. Stempitsky, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Deputy Editor-in-Chief

Olga V. Boiprav, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Responsible Secretary of the Editorial Board

Mikhail P. Batura, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Victor E. Borisenko, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Mehman H. Hasanov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Sergei V. Kozlov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Vladimir A. Labunov, Acad. of the NAS of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Yuri V. Pisetsky, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

Alexander S. Sigov, Acad. of the RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Alexander G. Smirnov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Mikhail M. Tatur, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Viktor Yu. Tsvetkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Responsible Secretary T. Mironenka

The journal is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus, Reg. No 1087.

The journal has been published since 2003. Last re-registration date January 23, 2010.

Index for individual subscription 00787, for departmental – 007872.

Signed for printing 15.10.2025. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.

Ed.-pr. l. 12,32. Ed.-ed. l. 10,0. Edition 75 copies. Order 185.

Editorial address

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

6, P. Brovki St., Off. 329a, 220013, Minsk

Tel.: +375 17 293-88-41

doklady@bsuir.by; <http://doklady.bsuir.by>

Printed in BSUIR. License LP No 02330/264 from 24.12.2020.

6, P. Brovki St., Room 329a, 220013, Minsk



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-5-11>

УДК 544.653.22

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ТОКОПРОВОДЯЩИЕ ПЕРЕХОДЫ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ НА ОСНОВЕ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А. Д. ЦАЛАДОНОВ, Д. В. РЕВЕНЬКО, С. А. БИРАН, А. В. КОРОТКЕВИЧ,
П. Э. НОВИКОВ, К. В. КОРСАК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Развитие технологий 2,5D- и 3D-интеграций кристаллов предъявляет к корпусам изделий микроэлектроники повышенные требования. Для изготовления корпусов перспективным материалом является анодный оксид алюминия, который позволяет формировать межслойные вертикальные электрические соединения различных слоев без дополнительных операций создания отверстий в межслойной изоляции. Это дает возможность получать на поверхности последующие слои с хорошей планаризацией. В статье рассмотрен способ изготовления подложек из пористого анодного оксида алюминия с изолированными токопроводящими площадками с помощью сквозного локального анодирования алюминия. Приведена методика исследования изоляционных свойств полученных диэлектрических подложек с различными способами улучшения качества изоляции токопроводящих каналов. Представлены результаты исследования токов утечки изолированных токопроводящих каналов в зависимости от приложенного напряжения.

Ключевые слова: 2,5D- и 3D-интеграция кристаллов, корпуса изделий микроэлектроники, наноструктурированные материалы, пористый анодный оксид алюминия, локальное анодирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вертикальные токопроводящие переходы в диэлектрических подложках на основе анодного оксида алюминия / А. Д. Цаладонов [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-5-11>.

VERTICAL CONDUCTIVE TRANSITIONS IN DIELECTRIC SUBSTRATES BASED ON ANODIC ALUMINUM OXIDE

ARSENI D. TSALADONOV, DIANA V. REVENKO, SIARHEI A. BIRAN,
ALEXANDR V. KOROTKEVICH, PAVEL E. NOVIKOV, KIRYL V. KORSAK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The development of 2.5D and 3D crystal integration technologies imposes increased requirements on the housings of microelectronic products. A promising material for the manufacture of housings is anodic aluminum oxide, which allows the formation of interlayer vertical electrical connections of different layers without additional operations of creating holes in the interlayer insulation. This makes it possible to obtain subsequent layers on the surface with good planarization. The article considers a method for manufacturing substrates from porous anodic aluminum oxide with insulated conductive pads using through local anodizing of aluminum. A methodology for studying the insulating properties of the obtained dielectric substrates with various methods for improving the quality of insulation of conductive channels is presented. The results of a study of leakage currents of isolated conductive channels depending on the applied voltage are presented.

Keywords: 2.5D and 3D crystal integration, microelectronics product housings, nanostructured materials, porous anodic aluminum oxide, local anodization.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Tsaladonov A. D., Revenko D. V., Biran S. A., Korotkevich A. V., Novikov P. E., Korsak K. V. (2025) Vertical Conductive Transitions in Dielectric Substrates Based on Anodic Aluminum Oxide. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-5-11> (in Russian).

Введение

По прогнозам зарубежных аналитических компаний, прирост капитализации рынка корпусирования изделий микроэлектроники составляет 9 % ежегодно и к 2030 г. достигнет 60 млрд долл. США [1, 2]. В настоящее время в связи с появлением и развитием технологий 2,5D- и 3D-интеграций кристаллов к корпусам интегральных микросхем предъявляются повышенные требования, в частности, к механическим и изоляционным свойствам [3].

Анодный оксид алюминия благодаря своим электрофизическим параметрам является перспективным материалом для применения в качестве основы корпусов изделий микроэлектроники. Использование наноструктурированных диэлектрических подложек на основе пористого анодного оксида алюминия позволяет формировать межслойные вертикальные электрические соединения различных слоев без дополнительных операций создания отверстий в межслойной изоляции [4, 5]. Это дает возможность формировать на поверхности последующие слои с хорошей планаризацией. Для оптимизации процессов проектирования и моделирования электрических характеристик корпусированных устройств необходимы данные изоляционных свойств материалов, из которых изготавливается корпус.

Методика проведения эксперимента

В качестве образцов для исследования диэлектрических свойств подложек с вертикальными токопроводящими переходами на основе анодного оксида алюминия использовали подложки с изолированными проводящими кругами различного диаметра. Для изготовления образцов брали заготовки размерами 60×48 мм из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм. Загрязнения с поверхности подложек удаляли раствором хромового ангидрида. Чтобы сгладить микронеровности поверхности, проводили травление в растворе NaOH в течение 30 мин. Далее для снятия внутренних механических напряжений осуществляли отжиг заготовок в термошкафу при температуре 250 °С в течение часа. Перед выполнением локального анодирования на поверхности заготовок при помощи фотолитографии формировали маску из фоторезиста. Анодирование проводили в растворе лимонной кислоты в потенциостатическом режиме при напряжении 100 В для получения пленки плотного анодного оксида алюминия на открытых участках подложки. После этого фоторезистивную маску удаляли с поверхности подложки. Перед нанесением второй маски из фоторезиста выполняли пористое анодирование в растворе ортофосфорной кислоты в потенциостатическом режиме при напряжении 90 В в течение 10 мин. Сформированный слой пористого оксида позволяет улучшить адгезию фоторезиста перед последующим сквозным анодированием.

Далее на поверхности заготовок формировали маску из фоторезиста заданной конфигурации (рис. 1, а). Сквозное окисление алюминия проводили в растворе щавелевой кислоты в гальваностатическом режиме при плотности тока 15 мА/см². Анодирование выполняли в специальной ванне с постоянным перемешиванием электролита и при поддержании постоянной температуры 20 °С. Время анодирования составило 8 ч до полного падения тока анодирования. Затем удаляли сформированную на поверхности подложки маску из фоторезиста (рис. 1, б).

Для исследования качества изоляции полученные образцы размещали на предметном столике микроскопа МБС-10. Токоподвод к проводящим площадкам осуществляли с помощью зондов с вольфрамовыми иглами. Измерение токов утечки проводили с помощью измерителя характеристик полупроводниковых приборов Л2-56. В режиме «Утечка» Л2-56 позволяет измерять токи порядка 1 нА. Один из зондов подключали к внешней проводящей части образцов, а второй – поочередно к токопроводящим площадкам (рис. 2). Далее измеряли токи утечки в зависимости от приложенного напряжения. Напряжение варьировалось от 200 до 1000 В с шагом 100 В.

На рис. 2 показан образец с токопроводящими каналами при различных способах изоляции: групповая изоляция, индивидуальная изоляция с варьированием ширины изолирующего кольца пористого анодного оксида алюминия, индивидуальная изоляция с использованием кольца с комбинированным плотным и пористым анодным оксидом алюминия. Параметры исследуемых площадок приведены в табл. 1.

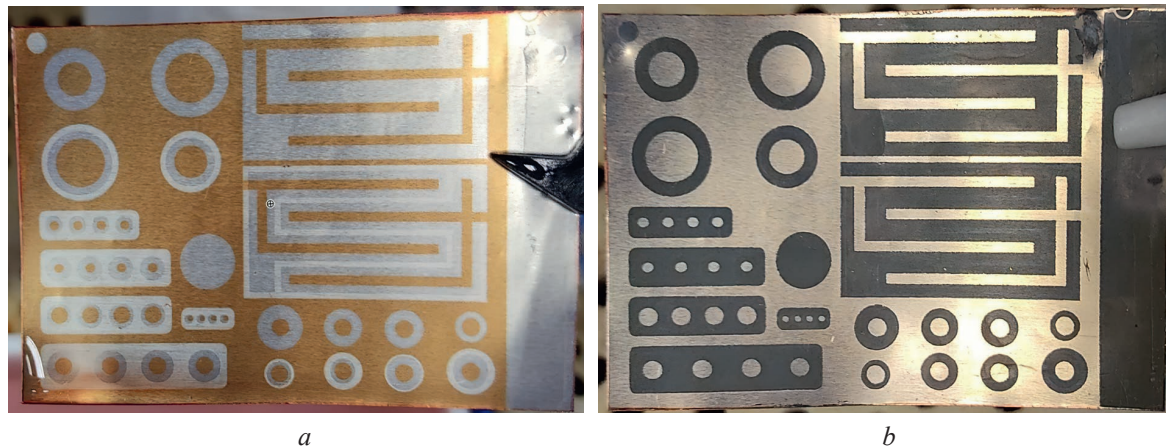


Рис. 1. Образец для исследования: *a, b* – до и после сквозного анодирования
Fig. 1. Sample for examination: *a, b* – before and after through anodizing

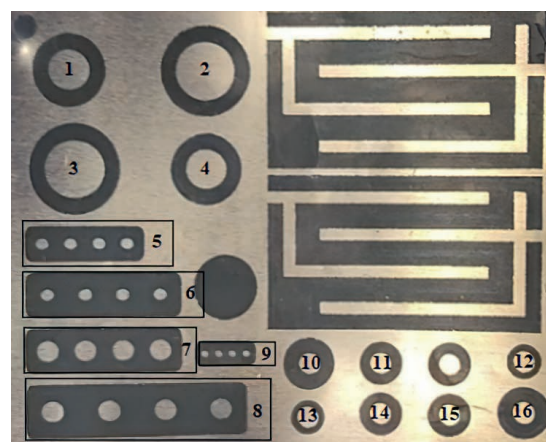


Рис. 2. Образец для исследования с пронумерованными токопроводящими площадками
Fig. 2. Test specimen with numbered conductive pads

Таблица 1. Параметры исследуемых площадок
Table 1. Parameters of the studied sites

Номер площадки	Диаметр, мм		
	площадки	кольца плотного оксида	кольца пористого оксида
1	4	–	8
2	6	–	10
3	6	8	10
4	4	6	8
5	1	2	–
6	1	3	–
7	2	3	–
8	2	4	–
9	0,5	1	–
10	2	–	7
11	2	–	5
12	2	–	4
13	2	3	4
14	2	3	5
15	2	4	5
16	2	5	7

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты измерений токов утечки в зависимости от приложенного напряжения исследуемых площадок представлены на рис. 3–6.

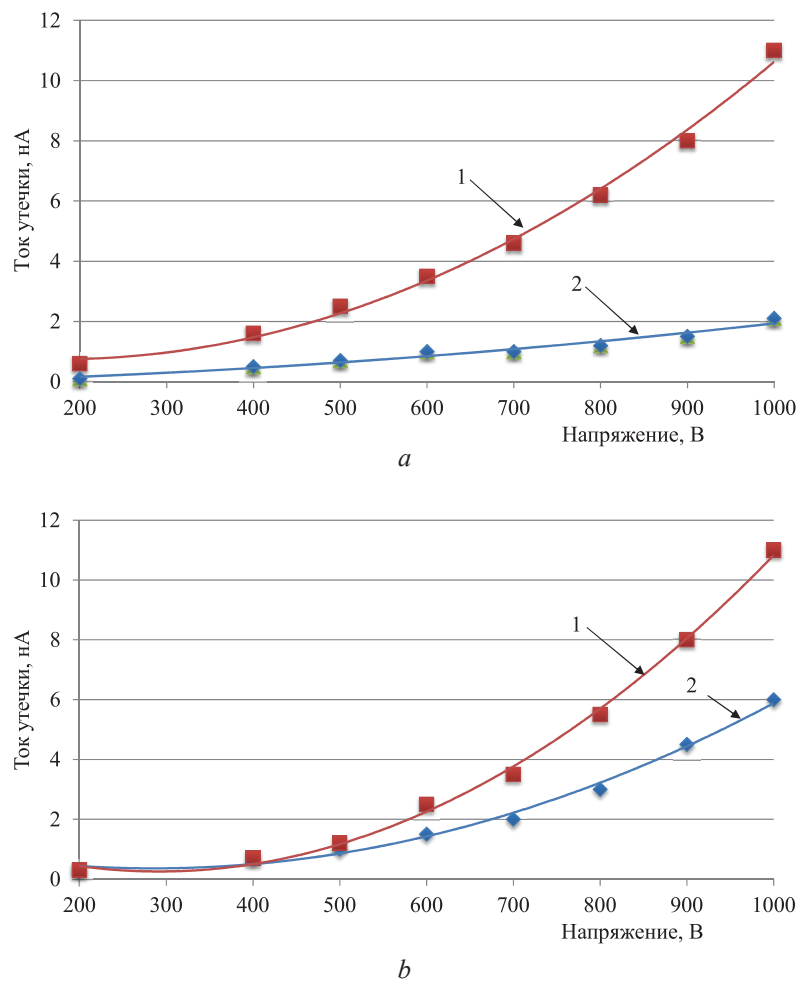


Рис. 3. Зависимость токов утечки образцов от напряжения:
а – 1 – площадка 3, 2 – площадка 2; б – 1 – площадка 4, 2 – площадка 1
Fig. 3. Dependence of leakage currents of samples on voltage:
а – 1 – pad 3, 2 – pad 2; б – 1 – pad 4, 2 – pad 1

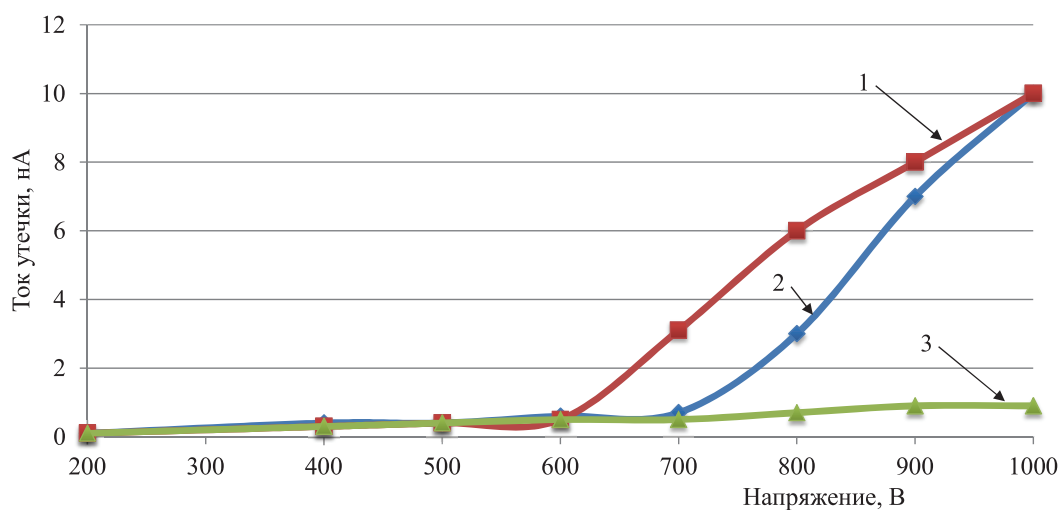


Рис. 4. Зависимость токов утечки образцов от напряжения на площадках: 1 – 14; 2 – 11; 3 – 15
Fig. 4. Dependence of leakage currents of samples on the voltage on the pads: 1 – 14; 2 – 11; 3 – 15

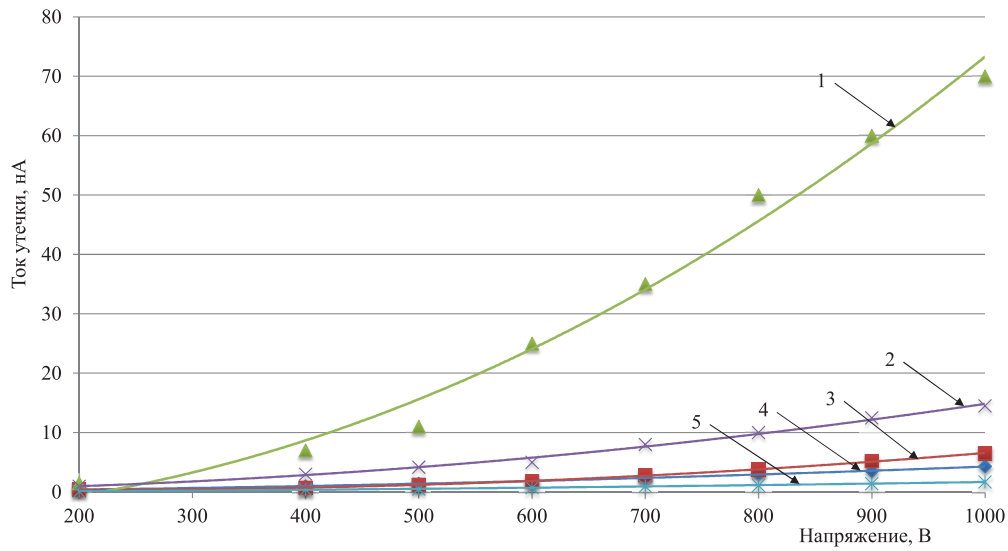
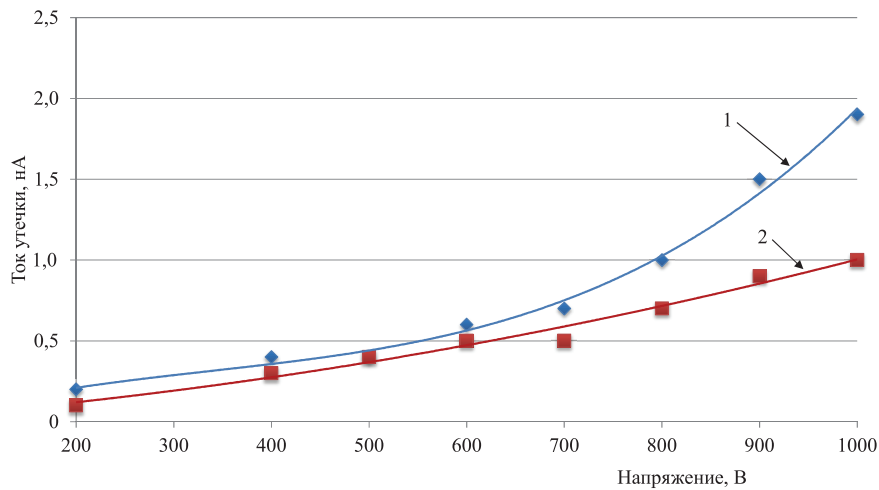
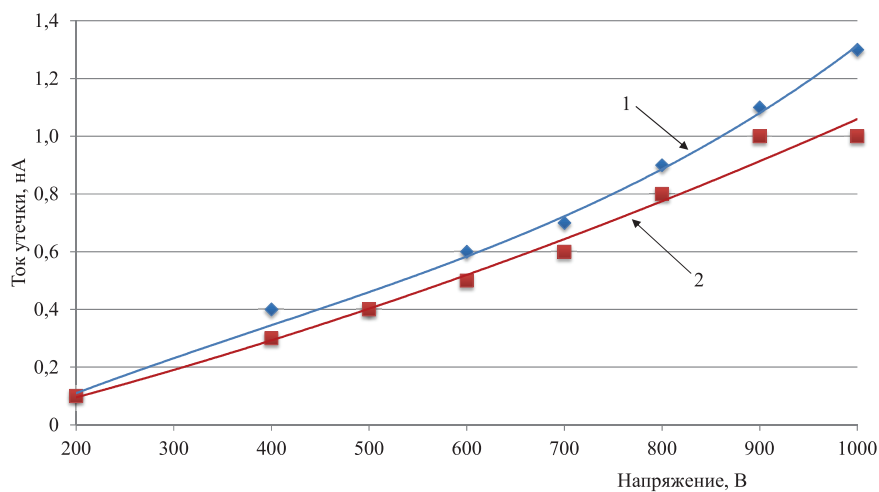


Рис. 5. Зависимость токов утечки образцов от напряжения на площадках: 1 – 7; 2 – 8; 3 – 6; 4 – 5; 5 – 9
Fig. 5. Dependence of leakage currents of samples on the voltage on the pads: 1 – 7; 2 – 8; 3 – 6; 4 – 5; 5 – 9



a



b

Рис. 6. Зависимость токов утечки образцов от напряжения: *a* – 1 – площадка 12, 2 – площадка 13;
b – 1 – площадка 10, 2 – площадка 16

Fig. 6. Dependence of leakage currents of samples on voltage: *a* – 1 – pad 12, 2 – pad 13;
b – 1 – pad 10, 2 – pad 16

Заключение

1. Показана возможность изготовления диэлектрических подложек с изолированными токопроводящими каналами с помощью локального сквозного анодирования через фоторезистивную маску.

2. Проведено исследование токов утечки образцов с различными способами изоляции токопроводящих каналов. Установлено, что у каналов с индивидуальной изоляцией токи утечки составляют единицы наноампер при напряжении 1000 В, а при использовании группового метода изоляции – десятки наноампер. Использование дополнительного кольца из плотного анодного оксида алюминия позволяет незначительно улучшить изоляционные свойства при применении индивидуальной изоляции.

Список литературы

1. Advanced Packaging Market Size, Share & Trends Analysis Report by Packaging Type (Flip-Chip, Fan-Out WLP, Embedded-Die, Fan-In WLP, 2.5D/3D), Application (Consumer Electronics, Automotive, Industrial, Healthcare), Region, with Growth Forecasts, 2025–2030 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.researchandmarkets.com/reports/6085858/advanced-packaging-market-size-share-and-trends>. Date of access: 26.05.2025.
2. Advanced Packaging Market: Global Industry Analysis and Forecast (2024–2030) [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-advanced-packaging-market/30807/>. Date of access: 26.05.2025.
3. Гагарина, Л. Г. Особенности разработки метода классификации плоских QFN-корпусов для применения в составе автоматизированных систем технической подготовки производства изделий микроэлектроники / Л. Г. Гагарина, Ю. В. Рубцов // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27, № 3. С. 322–332.
4. Hosseinabadi, Z. Developing Cu Pore-Filling Percentage in Hard Anodized Anodic Aluminum Oxide Templates with Large Diameters / Z. Hosseinabadi, A. Ramazani, M. Almasi Kash // Materials Chemistry and Physics. 2015. Vol. 260.
5. Nanostructured Anodic-Alumina-Based Dielectrics for High-Frequency Integral Capacitors / A. Mozalev [et al.] // Thin Solid Films. 2014. Vol. 550. P. 486–494.

Поступила 31.03.2025

Принята в печать 27.06.2025

References

1. *Advanced Packaging Market Size, Share & Trends Analysis Report by Packaging Type (Flip-Chip, Fan-Out WLP, Embedded-Die, Fan-In WLP, 2.5D/3D), Application (Consumer Electronics, Automotive, Industrial, Healthcare), Region, with Growth Forecasts, 2025–2030*. Available: <https://www.researchandmarkets.com/reports/6085858/advanced-packaging-market-size-share-and-trends> (Accessed 26 May 2025).
2. *Advanced Packaging Market: Global Industry Analysis and Forecast (2024–2030)*. Available: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-advanced-packaging-market/30807/> (Accessed 26 May 2025).
3. Gagarina L. G., Rubtsov Y. V. (2022) Peculiarities of Development of the Method of Classification of Flat QFN-Cases for Application in the Automated Systems of Technical Preparation of Production of Microelectronics Products. *News of Universities. Electronics*. 27 (3), 322–332 (in Russian).
4. Hosseinabadi Z., Ramazani A., Almasi M. (2015) KashDeveloping Cu Pore-Filling Percentage in Hard Anodized Anodic Aluminum Oxide Templates with Large Diameters. *Materials Chemistry and Physics*. 260.
5. Mozalev A., Sakairi M., Takahashi H., Habazaki H., Hubalek J. (2014) Nanostructured Anodic-Alumina-Based Dielectrics for High-Frequency Integral Capacitors. *Thin Solid Films*. 550, 486–494.

Received: 31 March 2025

Accepted: 27 June 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Цаладонов А. Д., магистрант каф. микро- и наноэлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ревенько Д. В., магистрант каф. микро- и наноэлектроники, БГУИР

Биран С. А., ст. преп. каф. микро- и наноэлектроники, БГУИР

Короткевич А. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. микро- и наноэлектроники, БГУИР

Новиков П. Э., инж.-электрон. науч.-исслед. лаб. «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», БГУИР

Корсак К. В., мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем», БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-90
E-mail: biran@bsuir.by
Биран Сергей Андреевич

Information about the authors

Tsaladonov A. D., Master's Student at the Micro- and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Revenko D. V., Master's Student at the Micro- and Nanoelectronics Department, BSUIR

Biran S. A., Senior Lecture at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Korotkevich A. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Novikov P. E., Electronics Engineer of the R&D Laboratory "CAD in Micro- and Nanoelectronics Systems", BSUIR

Korsak K. V., Junior Researcher of the R&D Laboratory "CAD in Micro- and Nanoelectronics Systems", BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-90
E-mail: biran@bsuir.by
Biran Siarhei Andreevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-12-19>

УДК 544.653.23; 535-92; 53.082.531

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО БИОСЕНСОРА НА ОСНОВЕ АНОДНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОКСИДОВ НИОБИЯ И ТАНТАЛА

А. В. ГОГА¹, Б. В. РОНИШЕНКО²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Одно из перспективных направлений label-free-анализа – оптические биосенсоры на основе 2D фотонных кристаллов, созданных из массива наностолбиков. Минусом таких кристаллов, сформированных, как правило, на основе кремния и его диоксида, является применение технологии фотолитографии. Использование фотонных кристаллов на базе самоорганизованных систем, таких как массивы наностолбиков оксида ниобия и тантала, полученных анодированием двухслойных систем Al/Nb и Al/Ta, позволяет решить данную проблему. Проведено моделирование оптических свойств фотонных кристаллов на основе массивов наностолбиков оксида ниобия и тантала. Чувствительность биосенсора определялась смещением главного пика отражения относительно его положения при заполнении пустот между наностолбиками фотонных кристаллов воздухом и биотином-стрептавидином. Выполнена оценка спектров отражения при специфическом и неспецифическом связывании биотина-стрептавидина с поверхностью фотонных кристаллов. Интенсивность главного пика отражения биосенсора на основе оксида тантала с металлическим подслоем Ta составила 0,41 отн. ед. на длине волны 353 нм, смещения пиков при распределении показателя преломления 1,46 для специфического и неспецифического связывания – 12 и 24 нм соответственно. Интенсивность главного пика отражения биосенсора на основе оксида ниобия с металлическим подслоем Nb составила 0,51 отн. ед. на длине волны 371 нм, смещения пиков отражения при распределении показателя преломления 1,46 для специфического и неспецифического связывания – 12 и 31 нм соответственно.

Ключевые слова: FDTD, анодирование, наноструктурированные оксиды, фотоника, фотонные кристаллы, label-free-детектирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гога, А. В. Моделирование оптического биосенсора на основе анодных наноструктурированных оксидов ниобия и тантала / А. В. Гога, Б. В. Ронищенко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 12–19. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-12-19>.

SIMULATION OF OPTICAL BIOSENSOR BASED ON ANODIC NANOSTRUCTURED NIOBIUM AND TANTALUM OXIDES

ALIAKSANDR V. HOHA¹, BAH DAN V. RANISHENKA²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Institute of Physical and Organic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. One of the promising areas of label-free analysis is optical biosensors based on 2D photonic crystals created from an array of nanopillars. The disadvantage of such crystals, usually formed on the basis of silicon and its dioxide, is the use of photolithography technology. The use of photonic crystals based on self-organized systems, such as arrays of niobium and tantalum oxide nanopillars obtained by anodizing two-layer Al/Nb and Al/Ta systems, allows us to solve this problem. The optical properties of photonic crystals based on arrays of niobium

and tantalum oxide nanopillars were simulated. The sensitivity of the biosensor was determined by the shift of the main reflection peak relative to its position when filling the voids between the nanopillars of photonic crystals with air and biotin-streptavidin. The reflection spectra were estimated for specific and non-specific binding of biotin-streptavidin to the surface of photonic crystals. The intensity of the main reflection peak of the biosensor based on tantalum oxide with a metallic Ta sublayer was 0.41 rel. units at a wavelength of 353 nm, the shifts of the peaks with a refractive index distribution of 1.46 for specific and non-specific binding were 12 and 24 nm, respectively. The intensity of the main reflection peak of the biosensor based on niobium oxide with a metallic Nb sublayer was 0.51 rel. units at a wavelength of 371 nm, the shifts of the reflection peaks with a refractive index distribution of 1.46 for specific and non-specific binding were 12 and 31 nm, respectively.

Keywords: FDTD, anodizing, nanostructured oxides, photonics, photonic crystals, label-free detection.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Hoha A. V., Ranishenka B. V. (2025) Simulation of Optical Biosensor Based on Anodic Nanostructured Niobium and Tantalum Oxides. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 12–19. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-12-19> (in Russian).

Введение

Использование наноструктурированных материалов для детектирования биомолекул позволяет добиться повышения эффективности анализа при снижении его стоимости. Одним из перспективных направлений label-free-анализа являются биосенсоры на основе 2D фотонных кристаллов (ФК), созданных из массива наностолбиков. Принцип работы таких ФК заключается в смещении положения пика отражения при заполнении средой, содержащей биомолекулы, пространства между наностолбиками, что приводит к изменению показателя преломления в межстолбиковом пространстве [1, 2]. Минус этих ФК, сформированных, как правило, на основе кремния и его диоксида, – использование технологии фотолитографии, что приводит к удорожанию. Кроме того, при уменьшении шага решетки ФК повышаются требования к оборудованию или созданию таких наноструктур вовсе делается невозможным. Решением данной проблемы могут быть самоорганизованные системы, такие как анодные наноструктурированные оксиды вентильных металлов, например, ниобия и тантала. Уже исследованы оптические свойства этих систем, обладающих исключительной термической стабильностью и химической инертностью. Для оптимизации морфологических и оптических свойств биосенсоров на их основе удобно использовать моделирование методом конечной разности во временной области (FDTD), что позволит сократить стадию экспериментального подбора оптимальных параметров ФК.

Известно, что ФК на основе наноструктурированного анодного оксида ниобия обладают достаточной сходимостью результатов оптического моделирования и свойств реальных структур [3]. В [4, 5] была показана теоретическая возможность использования ФК на основе массива наностолбиков оксида ниобия путем оптического моделирования в качестве оптического биосенсора биотина-стрептавида. Выявлено, что пик отражения смещается в длинноволновую область вплоть до 40 нм относительно пика отражения ФК, не заполненного биосредой, для выбранной морфологии ФК. Однако данный тип биосенсоров может не учитывать ситуацию, когда не происходит специфического связывания с поверхностью ФК. То есть прикрепление к поверхности осуществляется не за счет селективного прикрепления к специфичным центрам, а за счет физической адсорбции на поверхности. В данном случае также будет наблюдаться смещение пика отражения, но не будет понятно, был ли найден именно искомый биообъект, что наиболее актуально для многокомпонентных гетерогенных аналитических жидкостей.

В статье рассмотрен метод оценки отклика оптического биосенсора на основе 2D ФК для случаев специфического и неспецифического связывания биотина-стрептавида. В процессе исследований выполнено оптическое моделирование свойств ФК на основе наноструктурированных анодных оксидов ниобия и тантала в качестве биосенсора биотина-стрептавида с учетом специфического и неспецифического связывания молекул на поверхности.

Методика проведения моделирования

Все характеристики рассчитывались путем решения уравнений Максвелла с использованием FDTD-моделирования на базе программного комплекса Ansys Lumerical. При создании модели ФК принимались следующие допущения.

1. Морфологические параметры массива наностолбиков оксидов тантала и ниобия выбирались исходя из реально получаемых структур при анодировании двухслойных систем Al/Nb и Al/Ta в водных растворах щавелевой кислоты с учетом морфологических параметров, приведенных в [5].

2. Материалом подложки служило стекло.

3. При специфичном связывании длина цепочки биомолекулы принималась равной 5 нм, что можно представить в виде формирования оболочки толщиной 5 нм биотина-стрептавирина, образованной на поверхности оксидного наностолбика при условии, что плотность прикрепления составила 1 нм^{-2} . При неспецифическом связывании моделировалась ситуация, при которой происходило полное заполнение средой биотина-стрептавирина воздушных зазоров между наностолбиками.

4. Чувствительность биосенсора определялась по смещению главного пика отражения относительно его положения при заполнении пустот между наностолбиками ФК воздухом и средой с иным показателем преломления.

5. Показатель преломления биоактивных материалов принимался равным таковому для растворенного в крови человека биотина-стрептавирина [1].

Область симуляции составляла $77 \times 134 \text{ нм}^2$ в плоскости xy и 3760 нм – в направлении z -координаты. В качестве граничных условий области симуляции по координатам xy выбирались граничные условия Блоха, которые хорошо подходят для моделирования периодических структур, что подтверждается работами, где рассматривались схожие структуры с гексагональной решеткой [6], а также соответствуют рекомендациям разработчика программного обеспечения [7]. По z -координате сверху и снизу граничные условия были представлены идеально сочетающимися слоями (perfectly matched layers, PML). Минимальное количество слоев PML – 16. В качестве источника излучения выступал источник плоских волн с углом падения 25° в диапазоне длин волн 200–500 нм, поскольку в данном диапазоне ожидается пик отражения для оксидов тантала и ниобия. Шаг вычисления составил 0,25 нм, время симуляции – 1000 фс. Экран детектирования отраженного излучения располагался по z -координате. Значения комплексного показателя преломления для оксида ниобия были взяты из открытых баз данных [8].

При построении модели ФК на основе массива наностолбиков оксида тантала (ниобия) использовались морфологические параметры реального наноструктурированного анодного оксида тантала (ниобия), который возможно сформировать анодированием двухслойной системы Al/Nb и Al/Ta на стекле [9]. Методика формирования подобных наноструктур включает следующие основные этапы: анодирование верхнего слоя алюминия с формированием пористой матрицы оксида алюминия, которая задает морфологию массива наностолбиков оксида тантала (ниобия); реанодирование – задание высоты наностолбиков и травление с целью удаления анодного оксида алюминия. В результате формируется следующая структура наноструктурированного анодного оксида тантала (ниобия) (снизу вверх): стеклянная подложка, оставшийся металлический подслой тантала (ниобия), сплошной оксидный слой и массив наностолбиков оксида тантала (ниобия), расположенных нормально по отношению к плоскости подложки.

Таким образом, ФК с гексагональным распределением наностолбиков обладает следующими морфологическими параметрами: расстояние между наностолбиками (a) 77 нм, радиус наностолбика (R) 27 нм, высота 120 нм, толщина сплошного оксидного слоя 68 нм, толщина металлического слоя 20 нм, толщина стекла равна всей оставшейся области моделирования. На рис. 1 показана область моделирования гексагонального ФК. Распределение показателя преломления в области моделирования биосенсора по плоскости xy для случаев неспецифического и специфического связывания молекул биотина-стрептавирина показано на рис. 2. Распределение приведено для биосенсора на основе наностолбиков оксида тантала, однако для наностолбиков на основе оксида ниобия вид распределения будет аналогичным, за исключением показателя преломления для материала наностолбика. Видно, что при моделировании отклика биосенсора для случая специфического связывания показатель преломления биотина-стрептавирина распределен вокруг наностолбика оксида ниобия, образуя оболочку толщиной 5 нм с показателем преломления 1,46. Для случая неспецифического связывания показатель преломления биотина-стрептавирина распределен равномерно в среде массива наностолбиков оксида ниобия.

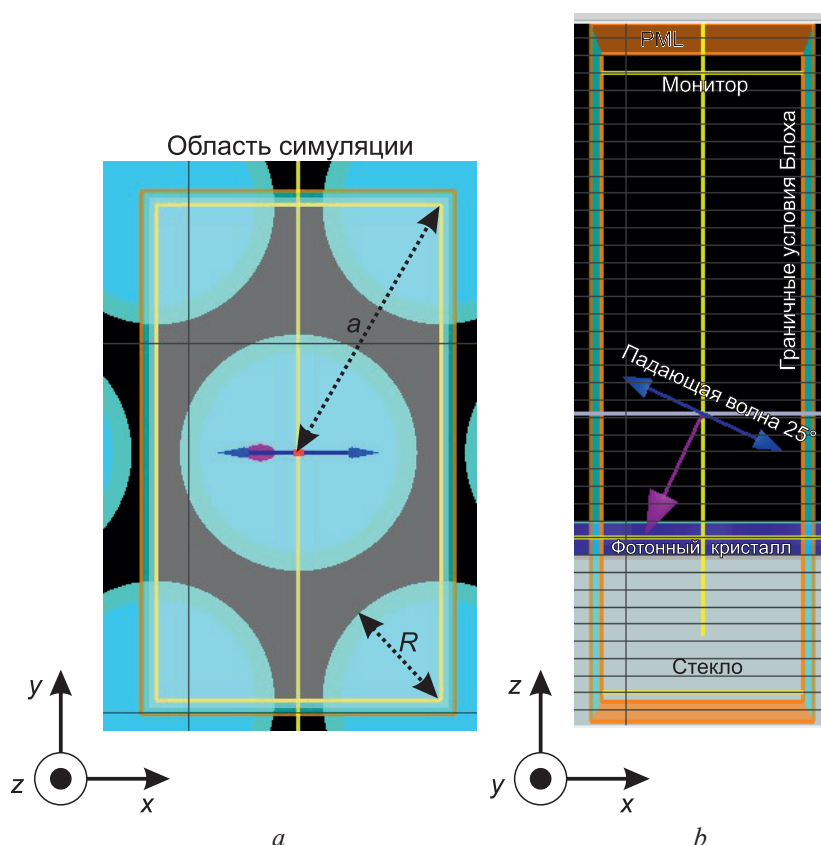


Рис. 1. Область моделирования фотонного кристалла: *a* – вид *xy*; *b* – вид *xz*
Fig. 1. Photonic crystal modeling area: *a* – *xy* view; *b* – *xz* view

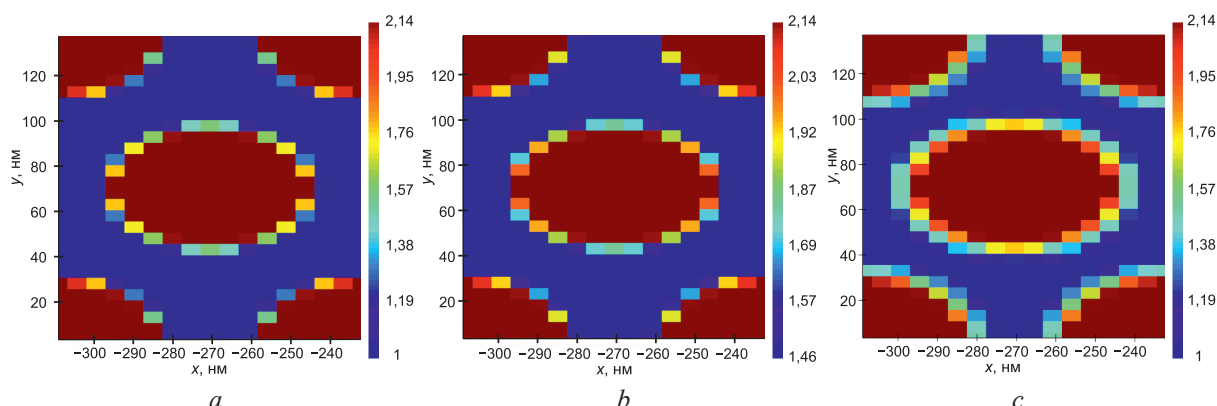


Рис. 2. Распределение показателя преломления в области моделирования биосенсора на основе массива наностолбиков оксида тантала: *a* – без биотина-стрептавидина; *b*, *c* – при неспецифическом и специфическом связывании биотина-стрептавидина соответственно
Fig. 2. Distribution of refractive index in area simulations of biosensor based on an array of niobium oxides nanocolumns: *a* – without biotin-streptavidin; *b*, *c* – with non-specific and specific binding of biotin-streptavidin, respectively

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 3 показан спектр отражения ФК на основе массива наностолбиков оксидов тантала и ниобия с соответствующими металлическими подслоями. Изображено смещение спектра отражения для случаев распределения показателя преломления в воздушной среде при специфическом и неспецифическом связывании. Для биосенсора на основе оксида тантала интенсивность главного пика отражения составила 0,41 отн. ед. на длине волны 353 нм. Интенсивность пика отражения для случая специфического связывания – 0,42 отн. ед. на длине волны 365 нм, при этом

смещение составило 12 нм. Интенсивность пика отражения для случая неспецифического связывания – 0,43 отн. ед. на длине волны 377 нм, смещение – 24 нм.

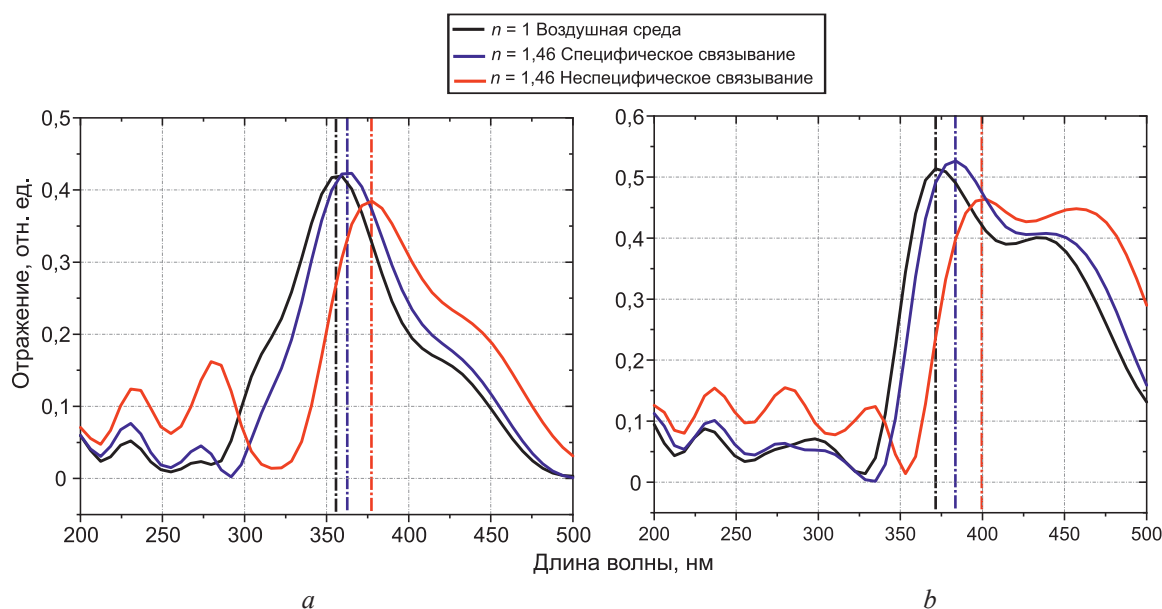


Рис. 3. Спектральные характеристики биосенсора в зависимости от типа связывания на основе фотонных кристаллов массива наностолбиков:

a – оксида тантала с подслоем Ta; *b* – оксида ниобия с подслоем Nb

Fig. 3. Spectral characteristics of a biosensor depending on the type of binding based on photonic crystals of an array of nanopillars:

a – tantalum oxide with a Ta sublayer; *b* – niobium oxide with a Nb sublayer

Полученные результаты моделирования спектра отражения позволяют сделать положительный вывод о возможности использования ФК на основе массива наностолбиков оксида тантала с металлическим подслоем на стекле в качестве оптического биосенсора. Смещение пика отражения на 12 нм для случая специфического связывания и на 24 нм для неспецифического связывания относительно пика отражения для воздушной среды является достаточным для детектирования лабораторным спектрофотометром, а также для определения типа связывания, поскольку между собой пики отличаются как по интенсивности, так и по длине волны. Форма спектра при этом имеет колоколообразный вид, составленный из нескольких пиков отражения. Данный вид спектра, вероятно, связан с совмещением пика отражения от массива наностолбиков и от границы раздела сплошного слоя оксида тантала и металлического подслоя Ta. Спектр отражения ФК на основе массива наностолбиков оксида ниобия с металлическим подслоем имеет более сложный характер: очевидно наличие двух высокоинтенсивных пиков отражения.

Смещение пика отражения, как оптический отклик на изменение показателя преломления среды, рассматривали по пику, приходящемуся на 371 нм с интенсивностью отражения 0,51 отн. ед., поскольку данный пик имеет более выраженный характер. Интенсивность пика отражения для случая специфического связывания составила 0,52 отн. ед. на длине волны 383 нм, смещение – 12 нм. Интенсивность максимума пика отражения для неспецифического связывания составила 0,46 отн. ед. на длине волны 402 нм, смещение – 31 нм. Данный результат моделирования оптических параметров ФК на основе массива наностолбиков оксида ниобия с металлическим подслоем Nb в качестве биосенсора позволяет сделать аналогичные выводы, как и для ФК на основе оксида тантала. Вероятно, вид спектра с двумя пиками связан с сильным отражением от границы раздела сплошного слоя оксида ниобия, совмещенного с массивом наностолбиков и металлического подслоя Nb.

Для оценки влияния металлического подслоя на вид спектра отражения и характеристики биосенсора проводили моделирование ФК на основе оксидных наностолбиков тантала и ниобия без металлического подслоя. При этом толщина сплошной оксидной пленки была увеличена на толщину отсутствующей металлической пленки. Биосенсор представлял собой следующую структуру (сверху вниз): массив оксидных наностолбиков – сплошной оксидный слой – стекло. На рис. 4 показано смещение спектра отражения для случаев распределения показателя пре-

ломления в воздушной среде, при специфическом и неспецифическом связывании на основе ФК массива наностолбиков без металлического подслоя.

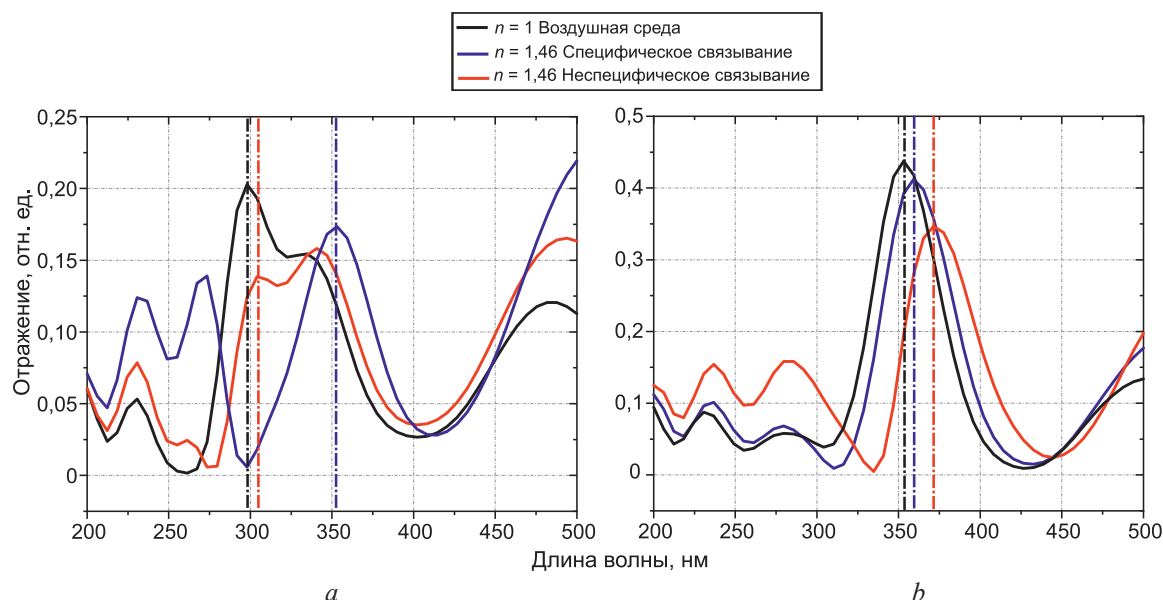


Рис. 4. Спектральные характеристики биосенсора в зависимости от типа связывания на основе фотонных кристаллов массива наностолбиков без металлического подслоя: *a* – оксида тантала; *b* – оксида ниобия

Fig. 4. Spectral characteristics of a biosensor depending on the binding type based on photonic crystals of a nanopillar array without a metal sublayer: *a* – tantalum oxide; *b* – niobium oxide

Для биосенсора на основе оксида тантала полученный спектр имеет сложный характер для однозначной оценки смещения главного пика отражения, поскольку интенсивность главного пика отражения массива наностолбиков оксида тантала невелика относительно побочных пиков отражения. Следовательно, при изменении показателя преломления среды смещение пиков отражения носит неоднозначный характер, так как наблюдается перераспределение интенсивности пиков отражения. Для ФК на основе массива наностолбиков оксида ниобия ситуация выглядит иначе: наблюдается ярко выраженный главный пик отражения, приходящийся на 353 нм с интенсивностью отражения 0,43 отн. ед. Интенсивность пика отражения для случая специфического связывания составила 0,41 отн. ед. на длине волны 359 нм, смещение – 6 нм. Интенсивность пика отражения для неспецифического связывания составила 0,37 отн. ед. на длине волны 371 нм, смещение – 18 нм.

Вид спектра отражения ФК на основе массива наностолбиков оксида ниобия без остаточного металлического подслоя позволяет однозначно оценить смещение в зависимости от распределения показателя преломления среды, что дает возможность использовать данную конфигурацию биосенсора на основе рассмотренного ФК. При этом удаление металлического подслоя Nb привело к исчезновению побочного пика отражения по сравнению со спектром на рис. 3. Таким образом, удаление металлического подслоя положительно сказалось на спектре отражения для ФК на основе оксида ниобия. Также получение анодированием двухслойной системы Al/Nb массива наностолбиков оксида ниобия без подслоя металла более технологично, поскольку не требуется прецизионного расчета исходной толщины пленки Nb и соответствующих режимов анодирования; здесь только необходимо полностью доокислить пленку Nb по всей толщине. Влияние на итоговый спектр отражения толщины сплошной пленки оксида ниобия в пределах 20 нм незначительно. Для выбранной морфологии ФК на основе оксида тантала присутствие металлического подслоя оказало значительное влияние на итоговый спектр отражения. Следовательно, для практической реализации биосенсора на его основе необходимо либо прецизионно определять исходную толщину пленки Ta, либо полностью изменить морфологию ФК таким образом, чтобы отсутствие металлической пленки не оказывало заметного влияния.

Следует отметить, что применение массива наноструктурированного анодного оксида тантала и ниобия в качестве оптического биосенсора биотина-стрептавидина практически нецелесообразно. Однако полученный результат позволяет допустить применение данной структуры

для детектирования олигонуклеотидов и вирусов путем иммобилизации биоспецифичных групп на поверхности и придания ей тем самым исключительных селективных свойств. При этом показано, что по смещению спектра отражения можно оценить, произошло ли прикрепление искомым биообъектов через специфичные центры или произошла физическая адсорбция на поверхности.

Заключение

1. Путем оптического моделирования фотонного кристалла на основе наноструктурированного анодного оксида тантала и ниобия обоснована возможность его использования в качестве биосенсора биотина-стрептавида. Проведена оценка специфического и неспецифического прикрепления биотина-стрептавида к поверхности массива наностолбиков.

2. При анализе выполненных исследований отмечено следующее:

- выбранная морфология для фотонного кристалла на основе наноструктурированных анодных оксидов ниобия и тантала на стекле, условно сформированных в щавелевой кислоте с расстоянием между наностолбиками 20 нм, диаметром 54 нм и высотой 120 нм, позволяет получить оптический биосенсор с достаточной чувствительностью;
- разница в смещении пика отражения для случаев специфического и неспецифического связывания позволяет проводить оценку по типу прикрепления биообъектов;
- интенсивность главного пика отражения биосенсора на основе оксида тантала с металлическим подслоем Ta составила 0,41 отн. ед. на длине волны 353 нм, смещения пика отражения при распределении показателя преломления 1,46 для специфического и неспецифического связывания – 12 и 24 нм соответственно;
- интенсивность главного пика отражения биосенсора на основе оксида ниобия с металлическим подслоем Nb составила 0,51 отн. ед. на длине волны 371 нм, смещение пика отражения при распределении показателя преломления 1,46 для специфического и неспецифического связывания – 12 и 31 нм соответственно;
- морфология фотонного кристалла на основе наностолбиков оксида тантала без металлического подслоя не позволяет применять данный кристалл в качестве биосенсора;
- интенсивность главного пика отражения биосенсора на основе оксида ниобия без металлического подслоя составила 0,43 отн. ед. на длине волны 353 нм, смещение пика отражения при распределении показателя преломления 1,46 для специфического и неспецифического связывания – 6 и 18 нм соответственно.

3. Исследование осуществлено при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «Конвергенция–2025», задание 3.03.3.

Список литературы

1. Yashaswini, P. R. Performance Analysis of Photonic Crystal Based Biosensor for the Detection of Bio-Molecules in Urine and Blood / P. R. Yashaswini, H. N. Gayathri, P. C. Srikanth // Mater. Today Proc. 2023. Vol. 80, No 3. P. 2247–2254. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.192>.
2. Label-Free Detection of DNA Hybridization Using Nanopillar Arrays Based Optical Biosensor / Jem-Kun Chen [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. 2013. Vol. 194. P. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.12.071>.
3. Pligovka, A. Properties of Porous Alumina Assisted Niobia Nanostructured Films-Designing 2 D Photonic Crystals Based on Hexagonally Arranged Nanocolumn / A. Pligovka, A. Poznyak, M. Norek // Micromachines. 2021. Vol. 12, No 6. <https://doi.org/10.3390/mi12060589>.
4. Two-Level 3D Column-Like Nanofilms with Hexagonally-Packed Tantalum Fabricated via Anodizing of Al/Nb and Al/Ta Layers – A Potential Nano-Optical Biosensor / A. Pligovka [et al.] // Materials. 2023. Vol. 16, No 3.
5. Гога, А. В. Моделирование оптического биосенсора на основе наноструктурированного анодного оксида ниобия / А. В. Гога // Компьютерное проектирование в электронике: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28 нояб. 2024 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2024. С. 112–115.
6. Bloch Boundary Conditions in FDTD and MODE [Electronic Resource]. Mode of access: <https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/360034382714-Bloch-boundary-conditions-in-FDTD-and-MODE>. Date of access: 19.05.2025.
7. Hexagonal GaN Nanorod-Based Photonic Crystal Slab as Simultaneous Yellow Broadband Reflector and Blue Emitter for Phosphor-Conversion White Light Emitting Devices / Suk-Min Ko [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10, No 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55684-9>.

8. Refractive Index [Electronic Resource]. Mode of access: <https://refractiveindex.info>. Date of access: 19.05.2025.
9. Formation Features, Morphology and Optical Properties of Nanostructures Via Anodizing Al/Nb on Si and Glass / A. Pligovka [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37, No 4. P. A8–A15.

Поступила 31.03.2025

Принята в печать 26.06.2025

References

1. Yashaswini P. R., Gayathri H. N., Srikanth P. C. (2023) Performance Analysis of Photonic Crystal Based Biosensor for the Detection of Bio-Molecules in Urine and Blood. *Mater. Today Proc.* 80 (3), 2247–2254. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.192>.
2. Jem-Kun Chen, Gang-Yan Zhou, Chi-Jung Chang, Chih-Chia Cheng (2013) Label-Free Detection of DNA Hybridization Using Nanopillar Arrays Based Optical Biosensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 194, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.12.071>.
3. Pligovka A., Poznyak A., Norek M. (2021) Properties of Porous Alumina Assisted Niobia Nanostructured Films-Designing 2 D Photonic Crystals Based on Hexagonally Arranged Nanocolumn. *Micromachines*. 12 (6). <https://doi.org/10.3390/mi12060589>.
4. Pligovka A., Lazavenka A., Turavets U., Hoha A., Salerno M. (2023) Two-Level 3D Column-Like Nanofilms with Hexagonally-Packed Tantalum Fabricated via Anodizing of Al/Nb and Al/Ta Layers – A Potential Nano-Optical Biosensor. *Materials*. 16 (3).
5. Hoha A. V. (2024) Modeling of Optical Biosensor Based on Nanostructured Anodic Niobium Oxide. *Computer-Aided Design in Electronics: Collection of Papers of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, Nov. 28*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 112–115 (in Russian).
6. *Bloch Boundary Conditions in FDTD and MODE*. Available: <https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/360034382714-Bloch-boundary-conditions-in-FDTD-and-MODE> (Accessed 19 May 2025).
7. Suk-Min Ko, Joonseok Hur, Chulwon Lee, Isnaeni, Su-Hyun Gong, MinKwan Kim, et al. (2020) Hexagonal GaN Nanorod-Based Photonic Crystal Slab as Simultaneous Yellow Broadband Reflector and Blue Emitter for Phosphor-Conversion White Light Emitting Devices. *Scientific Reports*. 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55684-9>.
8. *Refractive Index*. Available: <https://refractiveindex.info> (Accessed 19 May 2025).
9. Pligovka A., Hoha A., Turavets U., Poznyak A., Zakharau Y. (2021) Formation Features, Morphology and Optical Properties of Nanostructures Via Anodizing Al/Nb on Si and Glass. *Materials Today: Proceedings*. 37 (4), A8–A15.

Received: 31 March 2025

Accepted: 26 June 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Гога А. В., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Нанofотоника» и науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ронішенка Б. В., канд. хим. наук, науч. сотр., Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-69
E-mail: a.goga@bsuir.by
Гога Александр Владимирович

Information about the authors

Hoha A. V., Postgraduate of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Junior Researcher at the Research Laboratory “Nanophotonics” and Research Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Ranishenka B. V., Cand. Sci. (Chem.), Researcher, Institute of Physical and Organic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-69
E-mail: a.goga@bsuir.by
Hoha Aliaksandr Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-20-26>

УДК 621.373.826

ЛАЗЕРНО-АКТИВИРОВАННЫЕ ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

А. Н. КУПО

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (Гомель, Республика Беларусь)

Аннотация. Представлены результаты исследования лазерно-активированных процессов электрохимического осаждения функциональных тонкопленочных субмикронных токопроводящих структур с использованием цианистых электролитов. Исследовано воздействие на цианистые электролиты лазерного излучения с длинами волн $\lambda = 600\text{--}200$ нм, которое приводит к активной диссоциации соединений видов $K_iMe(CN)_j$, $Me_i(CN)_j$, $K_iMe_i(CN)_j$. Это способствует локальному росту градиента концентрации активных электрохимических частиц и обуславливает увеличение локальной скорости электрохимического осаждения в целом. Проанализировано влияние на указанные процессы таких параметров, как интенсивность лазерного излучения, коэффициент поглощения лазерного излучения электролитом (эффективное сечение поглощения) и квантовый выход диссоциации, которые определяются составом электролита и селективностью лазерного воздействия.

Ключевые слова: лазерные фотохимические процессы, цианистые электролиты, лазерно-активированное электрохимическое осаждение.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Купо, А. Н. Лазерно-активированные фотохимические процессы формирования тонкопленочных систем микроэлектроники / А. Н. Купо // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 20–26. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-20-26>.

LASER-ACTIVATED PHOTOCHEMICAL PROCESSES OF FORMATION OF THIN-FILM SYSTEMS OF MICROELECTRONICS

ALIAKSANDR KUPO

Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of a study of laser-assisted electrochemical deposition of functional thin-film submicron conductive structures using cyanide electrolytes. The effect of laser radiation with wavelengths of $\lambda = 600\text{--}200$ nm on cyanide electrolytes was investigated. This radiation leads to the active dissociation of compounds of the $K_iMe(CN)_j$, $Me_i(CN)_j$, and $K_iMe_i(CN)_j$ types. This promotes a local increase in the concentration gradient of active electrochemical species and causes an increase in the local rate of electrochemical deposition as a whole. The influence of such parameters as laser radiation intensity, the absorption coefficient of laser radiation by the electrolyte (effective absorption cross-section), and the dissociation quantum yield, which are determined by the composition of the electrolyte and the selectivity of the laser irradiation, on these processes was analyzed.

Keywords: laser photochemical processes, cyanide electrolytes, laser-activated electrochemical deposition.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Kupo A. (2025) Laser-Activated Photochemical Processes of Formation of Thin-Film Systems of Microelectronics. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 20–26. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-20-26> (in Russian).

Введение

Важным перспективным направлением является исследование влияния лазерного излучения на осаждение металлических тонкопленочных покрытий. При фотохимическом воздействии лазерного излучения происходит диссоциация металлсодержащих соединений в промышленных электролитах, в результате чего высвобождающиеся ионы металлов формируют токопроводящую субмикронную стереоструктуру.

Метод лазерной активации электролиза обладает рядом неоспоримых преимуществ в сравнении с другими способами гальванического осаждения. Во-первых, значительно (до 5-ти раз) [1] увеличивается скорость формирования топологического рисунка. Во-вторых, применение лазерного излучения обуславливает селективность процесса в целом. Кроме того, варьирование параметрами лазерного излучения в выбранном диапазоне позволяет формировать разнообразные поверхностные субмикронные структуры различного функционального назначения благодаря возможности управления такими свойствами покрытий, как микротвердость, износостойкость и электропроводность.

Варьирование длины волны (частоты) лазерного излучения в процессе формирования специальных покрытий методом гальваностегии приводит не только к предсказуемому возрастанию скорости самого процесса электролиза, но и к качественным преобразованиям в составе электролита. Например, воздействие лазерного излучения инфракрасного диапазона обуславливает термохимический механизм активации процесса электролиза. Между тем излучение оптического и ультрафиолетового диапазонов инициирует протекание фотохимических реакций на границе раздела фаз электролит–подложка [2–4]. Варьируя интенсивностью лазерного излучения в указанных диапазонах, можно инициировать возбуждение высших электронных уровней и даже ионизацию молекул в результате многофотонного поглощения.

Подавляющее большинство работ, посвященных данной теме, содержат результаты исследований термического механизма активирования электрохимии, в то время как фотохимический механизм практически не изучен. Цель исследований автора – разработка аналитической модели фотохимических процессов, активированных лазерным излучением оптического и ультрафиолетового диапазонов, при формировании тонкопленочных металлических субмикронных структур.

Физико-химические процессы в электролитах, активированные лазерным излучением

Термодинамический подход позволяет представлять электролитическую ячейку как гетерофазную открытую систему – электролит, приэлектродный слой ионного насыщения и модифицируемая поверхность тонкопленочного покрытия металлизации. В электролите при наложении электрического смещения (разности потенциалов электродов) происходит вынужденная диффузия анионов и катионов. Как известно, градиент концентрации и коэффициент диффузии в конечном итоге определяют скорость миграции ионов металла [3]. При поглощении импульса лазерного излучения в указанной системе происходят электронное возбуждение, фотоионизация и фотодиссоциация молекул и ионов электролита. В результате возникает термодинамически неравновесная концентрация высокоактивных ионов, и в реагирующей системе создаются специфические условия, что порождает энергетические превращения, не обусловленные тепловой формой движения.

Наиболее характерными примерами электролитов, в которых восстанавливаемая форма представляет собой комплексные ионы, являются растворы цианистых солей никеля, меди, серебра, золота, цинка и других металлов [3]. Скорость осаждения указанных металлов зависит от выхода по току.

Лазерный механизм фотохимического воздействия на такую гетерогенную систему реализуется при разрыве координационной связи между ионами металла и одним из лигандов, что является следствием возбуждения комплекса и образования радикальной пары с малым временем жизни. Образовавшийся радикал может вновь окислить восстановленную форму металла-комплексобразователя или вернуться в раствор. При этом возможными вариантами развития реакции могут быть как замещение другими лигандами, так и распад восстановительной формы комплекса.

Воздействие на указанные электролиты лазерного излучения с длинами волн $\lambda = 600\text{--}200\text{ нм}$ приводит к активации процесса диссоциации цианистых соединений типов $K_iMe(CN)_j$, $Me_i(CN)_j$, $K_iMe_i(CN)_j$ и других подобных комплексов. Это способствует, с одной стороны, снижению концентрации исходных химических соединений, но с другой – создает градиент концентрации продуктов диссоциации, в частности, свободных ионов металлов (Me), тем самым обуславливая увеличение локальной скорости электрохимического осаждения в целом [2–4].

Для исследования влияния различных параметров фотоэлектрохимического процесса на эффективность фотодиссоциации комплексных ионов была составлена аналитическая модель такого процесса, полученная в результате решения системы дифференциальных уравнений на основании закона Бугера – Ламберта – Бера (закона Бугера) в дифференциальной форме.

Постановка задачи и моделирование

С одной стороны, лазерное излучение, проходя электролит, испытывает ослабление энергетических характеристик (в частности, интенсивности), что приводит к меньшей интенсификации фотохимической диссоциации цианистых комплексов. С другой, осаждающиеся на поверхности катода металлические покрытия, тем более в присутствии блескообразующих добавок в электролитах, традиционно обладают высокими коэффициентами отражения $R = 0,90\text{--}0,98$, что делает необходимым учитывать интенсивность отраженного излучения, которое тоже испытывает ослабление в соответствии с законом Бугера при распространении в обратном направлении. Энергия излучения, распределенная в слое электролита h вдоль координаты x в пределах диаметра зоны влияния лазерного излучения, определяется суммарной интенсивностью (рис. 1).

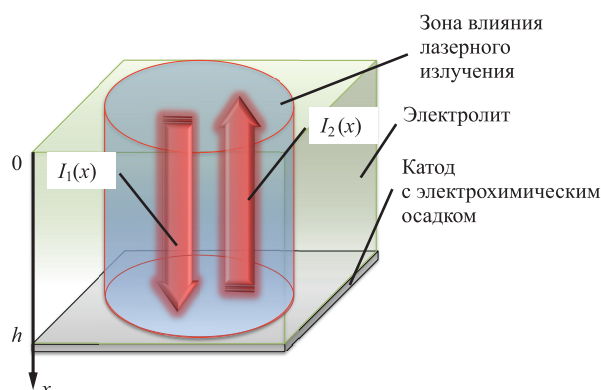


Рис. 1. Схема лазерной фотохимической активации электрохимических процессов
Fig. 1. Scheme of laser photochemical activation of electrochemical processes

Для получения аналитической модели решалась задача о стационарном распределении интенсивности потока монохроматического лазерного излучения с граничным значением интенсивности I_0 в слое фоточувствительного раствора электролита толщиной h с начальной концентрацией n_0 вдоль координаты x (рис. 1). При этом, спустя несколько наносекундных импульсов, в системе возникает стационарное распределение интенсивности и концентрации вдоль зоны лазерного влияния.

Закон Бугера можно представить в виде дифференциального уравнения для определения интенсивности в стационарном режиме. При этом составляющая интенсивности $I_1(x)$ с увеличением координаты x будет уменьшаться, в то время как $I_2(x)$ – возрастать:

$$\begin{cases} \frac{dI_1}{dx} = -\sigma I_1(x)n(x); \\ \frac{dI_2}{dx} = \sigma I_2(x)n(x), \end{cases} \quad (1)$$

где σ – эффективная площадь сечения поглощения, $\sigma = \varepsilon / N_A$, $\text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$, используется вместо коэффициента экстинкции ε , м^{-1} ; N_A – число Авогадро; $I_i(x)$ – интенсивность лазерного излучения, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $n(x)$ – концентрация, м^{-3} .

Антиградиент концентрации dn/dx фотовосприимчивого компонента электролита направлен в сторону уменьшения концентрации, т. е. пропорционален функции распределения концентрации $n(x)$ с противоположным знаком. Кроме того, изменение концентрации по глубине электролита вдоль координаты x обусловлено текущей эффективностью поглощения фотонов на рассматриваемой глубине, которая численно определяется значением σ и квантовым эффектом фотодиссоциации η (отн. ед.). Величина η равна относительному числу сохранившихся фотовосприимчивых комплексов на каждый ватт мощности лазерного излучения, приходящийся на один квадратный метр электролита, в плоскости, перпендикулярной направлению оси x (рис. 1). Такую зависимость с учетом

$$I(x) = I_1(x) + I_2(x) \quad (2)$$

можно представить следующим образом:

$$\frac{dn}{dx} = -\sigma(1-\eta)n(x)I(x). \quad (3)$$

Граничные условия для системы дифференциальных уравнений, включающей (2) и (3), можно представить в виде:

$$\begin{cases} I_1(0) = I_0; \\ I_2(0) = RI_0 \exp(-\sigma n_0 h); \\ n(0) = n_0. \end{cases} \quad (4)$$

Полученная система дифференциальных уравнений (1)–(4) допускает в более простом частном случае аналитическое решение, приведенное в [1]. Однако в представленной форме, а также с целью изучения физико-химического поведения системы в широком диапазоне изменения параметров исследуемого процесса, целесообразно использовать численные методы, реализованные, например, в системе MATLAB [5]. Такую систему можно решить, применяя встроенную функцию *ode45*. Для этого (1)–(3) можно представить в стандартном виде:

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dx} &= \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_1(x) \\ I_2(x) \\ n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma I_1(x)n(x) \\ \sigma I_2(x)n(x) \\ -\sigma(1-\eta)n(x)(I_1(x) + I_2(x)) \end{bmatrix}; \\ F &= \begin{bmatrix} I_1(x) \\ I_2(x) \\ n(x) \end{bmatrix}; \\ f(x, F) &= \begin{bmatrix} -\sigma I_1(x)n(x) \\ \sigma I_2(x)n(x) \\ -\sigma(1-\eta)n(x)(I_1(x) + I_2(x)) \end{bmatrix}; \\ F(0) &= \begin{bmatrix} I_0 \\ RI_0 \exp(-\sigma n_0 h) \\ n_0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

В системе MATLAB были составлены script-файлы, позволяющие провести моделирование системы (5) по алгоритму Рунге – Кутты 4–5-го порядков. Тем самым реализуется одношаговый алгоритм для вычисления искомых интенсивности $I(x)$ и концентрации $n(x)$ по глубине слоя электролита h с относительной ошибкой не более 10^{-3} %.

Анализ результатов

На рис. 2 представлены графики распределения интенсивности и концентрации по глубине слоя электролита $0 \leq h \leq 5$ см при $\sigma = 0,01$ м²/моль, $\eta = 10^{-8}$ моль/Дж, $I_0 = 10^4$ – 10^5 Вт/м²

и $n_0 = 200$ моль/м³. Это соответствует параметрам воздействия на цианистый электролит серебра ($K[Ag(CN)_2] - 40$ г/л, $KCN - 50$ г/л, $K_2CO_3 - 40$ г/л, $KNO_3 - 60$ г/л). Как видно из рис. 2, при указанных параметрах интенсивность лазерного излучения практически не изменяется с учетом усиления при отражении от поверхности катода (коэффициент отражения $R = 0,98$ для серебряного покрытия). В случае с концентрацией исследуемых цианидных комплексов можно заметить, что при увеличении интенсивности на порядок концентрация уменьшается почти на 50 %, что свидетельствует об эффективности лазерной активации вблизи поверхности катода в тонком приэлектродном слое порядка нескольких миллиметров.

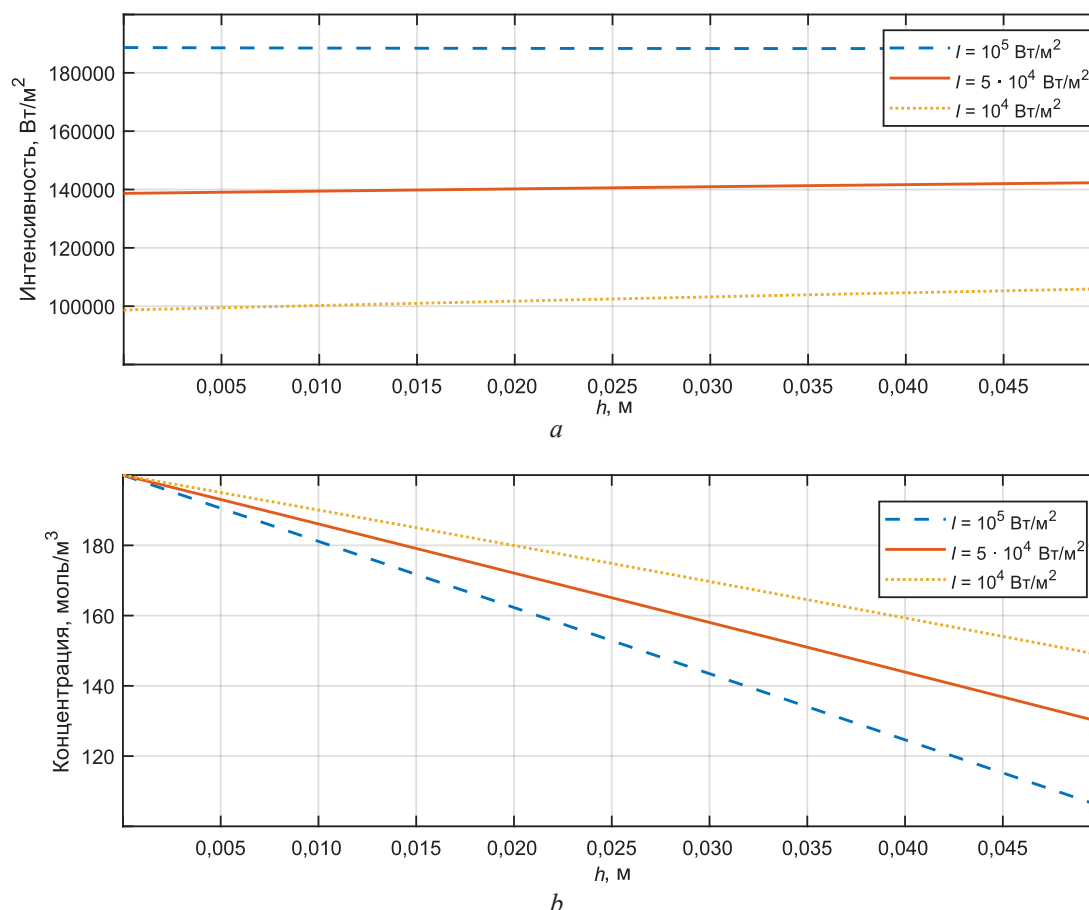


Рис. 2. Распределение интенсивности лазерного излучения $I(a)$ и концентрации $n(b)$ цианидных комплексов $K[Ag(CN)_2]$ по глубине слоя электролита h для различных значений I при $\sigma = 0,01$ м²/моль и $n_0 = 200$ моль/м³

Fig. 2. Distribution of laser radiation intensity $I(a)$ and concentration $n(b)$ of cyanide complexes $K[Ag(CN)_2]$ by the depth of the electrolyte layer h for different values of I at $\sigma = 0.01$ m²/mol and $n_0 = 200$ mol/m³

При увеличении коэффициента поглощения в 10 раз ($\sigma = 0,1$ м²/моль), что может быть обусловлено использованием другой длины волны излучения, а начальной концентрации в 2,5 раза ($n_0 = 500$ моль/м³) графические зависимости имеют вид, представленный на рис. 3. Из рис. 3 можно увидеть, что при таких условиях с уменьшением начальной интенсивности лазерного излучения в два раза концентрация в пределах слоя электролита уменьшается в 1,5 раза для $I_0 = 10^4$ Вт/м² и более чем в три раза – для $I_0 = 10^5$ Вт/м². При этом на графике зависимости интенсивности наблюдается минимум (примерно в области 2,5 см), наиболее явно выделенный для $I_0 = 5 \cdot 10^4$ Вт/м². Кроме того, вблизи поверхности катода значительное ослабление испытывает лазерное излучение с наибольшей начальной интенсивностью $I_0 = 10^5$ Вт/м². Этот эффект можно объяснить тем, что лазерное излучение с большей начальной мощностью эффективно разрушает фоточувствительные цианидные комплексы, поэтому отраженное от катода излучение $I_2(x)$ вносит весомый вклад в суммарную интенсивность (формула (2)). Данный эффект наименее ярко выражен для поверхностей с низким коэффициентом отражения R .

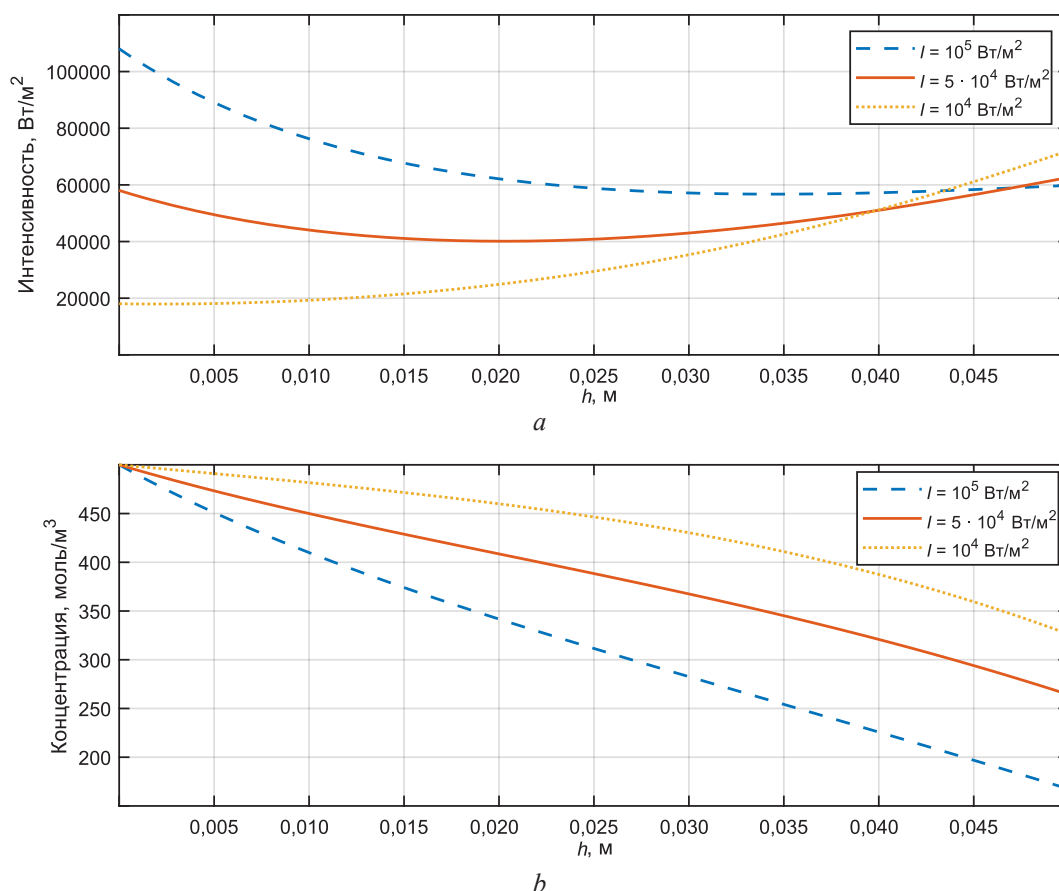


Рис. 3. Распределение интенсивности лазерного излучения $I(a)$ и концентрации $n(b)$ цианидных комплексов $K[Ag(CN)_2]$ по глубине слоя электролита h для различных значений I при $\sigma = 0,1 \text{ м}^2/\text{моль}$ и $n_0 = 500 \text{ моль}/\text{м}^3$

Fig. 3. Distribution of laser radiation intensity $I(a)$ and concentration $n(b)$ of cyanide complexes $K[Ag(CN)_2]$ by the depth of the electrolyte layer h for different values of I at $\sigma = 0.1 \text{ м}^2/\text{моль}$ and $n_0 = 500 \text{ моль}/\text{м}^3$

Анализ рассматриваемой модели показал, что варьирование квантового выхода фотодиссоциации η от 10^{-6} до 10^{-10} моль/Дж практически не сказывается на показателях, представленных на рис. 2 и 3. Наиболее эффективное влияние на концентрацию фоточувствительных компонентов оказывают изменения эффективного сечения поглощения σ , а также начальных значений концентрации n_0 и интенсивности лазерного излучения I_0 .

Закключение

1. Посредством математического моделирования воздействия лазерного излучения с различной длиной волны на цианистый электролит серебра установлено, что рост концентрации продуктов диссоциации комплексов $K_iMe(CN)_j$, $Me_i(CN)_j$, $K_iMe_i(CN)_j$ обусловлен увеличением интенсивности лазерного излучения.

2. Установлено, что с увеличением сечения поглощения в диапазоне $0,01\text{--}0,10 \text{ м}^2/\text{моль}$ степень диссоциации комплексных молекул повышается более чем в три раза, а интенсивность излучения вблизи катода практически не изменяется благодаря эффективному отражению от серебряного покрытия. Квантовый выход в пределах $10^{-6}\text{--}10^{-10}$ моль/Дж практически не влияет на эффективность лазерной фотодиссоциации.

3. Результаты моделирования могут найти применение при разработке технологий лазерной фотохимической модификации фоточувствительных материалов электронной техники.

Список литературы

1. Купо, А. Н. Лазерная технология интенсификации гальванического осаждения функциональных покрытий / А. Н. Купо, А. А. Хмыль, В. Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. 2016. № 8. С. 42–46.

2. Photochemistry (Definition of Terms) [Electronic Resource] // Chemical Engineering Matters. Mode of access: <https://chemicalengineeringmatters.wordpress.com/2014/12/17/photochemistry-definition-of-terms/>. Date of access: 26.08.2025.
3. Upadhyay, Sh. Photochemical Reaction and Applications in Organic Synthesis / Sh. Upadhyay, J. Kumar // ICBC. 2021. Vol. 1, No 4. DOI: 10.33552/ICBC.2021.01.000520.
4. Купо, А. Н. Фотохимический механизм стимуляции процесса электрохимической обработки материалов / А. Н. Купо // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2009. № 4. С. 123–131.
5. Solve Nonstiff Differential Equations – Medium Order Method [Electronic Resource] // MATLAB Help Center. Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html>. Date of access: 20.08.2025.

Поступила 15.07.2025

Принята в печать 27.08.2025

References

1. Kupo A. N., Khmyl A. A., Lanin V. L. (2016) Laser Technology of Intensification of Galvanic Deposition of Functional Coatings. *Technology in the Electronics Industry*. (8), 42–46 (in Russian).
2. Photochemistry (Definition of Terms). *Chemical Engineering Matters*. Available: <https://chemicalengineeringmatters.wordpress.com/2014/12/17/photochemistry-definition-of-terms/> (26 August 2025).
3. Upadhyay Sh., Kumar J. (2021) Photochemical Reaction and Applications in Organic Synthesis. *ICBC*. 1 (4). DOI: 10.33552/ICBC.2021.01.000520.
4. Kupo A. N. (2009) Photochemical Mechanism of Stimulation of the Process of Electrochemical Processing of Materials. *News of the F. Skorina Gomel State University*. (4), 123–131 (in Russian).
5. Solve Nonstiff Differential Equations – Medium Order Method. *MATLAB Help Center*. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html> (20 August 2025).

Received: 15 July 2025

Accepted: 27 August 2025

Сведения об авторе

Купо А. Н., канд. техн. наук, доц., нач. центра информационных технологий, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

Information about the author

Kupo A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Center for Information Technologies, Francisk Skorina Gomel State University

Адрес для корреспонденции

246019, Республика Беларусь,
Гомель, ул. Советская, 102, корп. 5
Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины
Тел.: +375 29 630-32-62
E-mail: kupo@gsu.by
Купо Александр Николаевич

Address for correspondence

246019, Republic of Belarus,
Gomel, Sovetskaya St., 102, Bld. 5
Francisk Skorina
Gomel State University
Tel.: +375 29 630-32-62
E-mail: kupo@gsu.by
Kupo Aliaksandr



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-27-34>

УДК 538.911; 538.958; 538.975; 544.641; 621.383

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: СИНТЕЗ, СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА, ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ

В. В. ХОРОШКО¹, Т. Н. ОСМОЛОВСКАЯ^{1,2}, А. В. СТАНЧИК², Н. Г. ПУГАЧ³,
А. С. ДОРОШКЕВИЧ⁴, Ю. В. РАДЮШ², И. И. КУЗЬМАР¹, Е. В. ЛОСКО^{1,5}

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
(Минск, Республика Беларусь)

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Москва, Российская Федерация)

⁴Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Российская Федерация)

⁵ОАО «НИИЭВМ» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье представлены результаты получения крупноблочных поликристаллов системы полупроводниковых твердых растворов $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, образующихся во всем диапазоне концентраций. Установлено, что как соединения $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$, так и твердые растворы имеют тетрагональную структуру станнита $I4_2m$ с соотношением параметров элементарной ячейки $c/a \sim 2$. Параметры элементарной ячейки изменялись линейно в соответствии с законом Vegard – от $a = (5,704 \pm 0,005) \text{ \AA}$ и $c = (11,26 \pm 0,01) \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$ до $a = (5,441 \pm 0,005) \text{ \AA}$ и $c = (10,72 \pm 0,01) \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. Установлены зависимости рентгеновской плотности и температуры Дебая. По результатам дифференциального термического анализа определены температуры плавления образцов, построена диаграмма состояния системы.

Ключевые слова: станнит, разбавленные магнитные полупроводники, кристаллическая структура, диаграмма состояния.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Полупроводниковые твердые растворы $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: синтез, структурные свойства, диаграмма состояния / В. В. Хорошко [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 27–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-27-34>.

SEMICONDUCTOR SOLID SOLUTIONS $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: SYNTHESIS, STRUCTURAL PROPERTIES, STATE DIAGRAM

VITALIY V. KHOROSHKO¹, TATIANA N. OSMOLOVSKAYA^{1,2}, ALIONA V. STANCHIK²,
NATALIA G. PUGACH³, ALEXANDR S. DOROSHKEVICH⁴,
YURI V. RADYUSH², INNA I. KUZMAR¹, ALENA U. LOSKA^{1,5}

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science
(Minsk, Republic of Belarus)

³National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russian Federation)

⁴Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russian Federation)

⁵OJSC “NIIEVM” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of obtaining large-block polycrystals of the semiconductor solid solution system $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, formed in the entire concentration range. It was found that both

the compounds $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$ and the solid solutions have a tetragonal stannite structure $I4_2m$ with a ratio of the unit cell parameters $c/a \sim 2$. The unit cell parameters varied linearly in accordance with Vegard's law – from $a = (5.704 \pm 0.005) \text{ \AA}$ and $c = (11.261 \pm 0.01) \text{ \AA}$ for $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$ to $a = (5.441 \pm 0.005) \text{ \AA}$ and $c = (10.72 \pm 0.01) \text{ \AA}$ for $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. The dependences of the X-ray density and the Debye temperature were determined. Based on the results of differential thermal analysis, the melting temperatures of the samples were determined and a system phase diagram was constructed.

Keywords: stannite, dilute magnetic semiconductors, crystal structure, state diagram.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation. Khoroshko V. V., Osmolovskaya T. N., Stanchik A. V., Pugach N. G., Doroshkevich A. S., Radyush Y. V., Kuzmar I. I., Loska A. U. (2025) Semiconductor Solid Solutions $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: Synthesis, Structural Properties, State Diagram. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 27–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-27-34> (in Russian).

Введение

Четвертные полупроводниковые соединения класса $\text{Cu}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}\text{X}_4^{\text{VI}}$ ($\text{A}^{\text{II}} = \text{Zn, Cd, Ni, Fe, Co, Mn}$; $\text{B}^{\text{IV}} = \text{Si, Ge, Sn}$; $\text{X}^{\text{VI}} = \text{S, Se}$) являются перспективными материалами для реализации широкой группы полупроводниковых устройств в связи с большим набором параметров по сравнению с тройными соединениями, что обусловлено усложнением их состава и кристаллической структуры. Полупроводники группы $\text{Cu}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}\text{X}_4^{\text{VI}}$ вызывают научный интерес благодаря множеству возможностей варьирования химического состава и, следовательно, оптимизации функциональности материала под конкретное применение. Среди данного класса перспективной является система $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ (CFTSSe). Так, соединение $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ обладает уникальными структурными, электронными и магнитными характеристиками [1–3]. Материал может применяться в фотоэлектрических преобразователях благодаря высокому коэффициенту оптического поглощения и близкой к оптимальной ширине запрещенной зоны [4, 5]. Также $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ обладает хорошей каталитической активностью [6–8]. Потенциал для применения их в энергохранилищах подтверждается высокими электрофизическими характеристиками в Li-ion батареях [9]. Перспективные исследования направлены на интеграцию $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ в спинтронику, гибридные наноконпозиции и экологически безопасное промышленное производство [10].

Как показал анализ литературы, несмотря на большое количество публикаций, свойства системы твердых растворов CFTSSe исследованы довольно мало и не в полном диапазоне концентраций, что не позволяет установить зависимости фундаментальных свойств. В статье приведены результаты дифференциального термического анализа и диаграмма состояния системы CFTSSe, полученные в процессе исследований.

Проведение эксперимента

Синтез поликристаллов CFTSSe. Поликристаллические образцы были получены однотемпературным методом. Элементарные медь, олово, сера, селен чистотой не менее 99,999 % и железо чистотой 99,998 % загружали в кварцевые ампулы в соотношении $\text{Cu:Fe:Sn:(S + Se)} = 2:1:1:4,05$ с расчетной общей массой кристалла 15–20 г. Количество серы и/или селена бралось с небольшим избытком для создания противодавления внутри ампулы. Ампулы предварительно подвергались травлению, многократной промывке в деионизированной воде, термической обработке при $T = 1173 \text{ K}$.

Ампулы с веществом подсоединяли к вакуумной системе и откачивали до остаточного давления 10^{-2} – 10^{-3} Па . Свободный конец ампулы с исходными компонентами для предотвращения потерь халькогенов во время отпайки поддерживали при температуре 273 K. После отпайки ампулу с веществом размещали в наружной ампуле, которую также откачивали и производили ее отпайку.

Синтез проходил в печах по методике Бриджмена. Повышающий температурный градиент для обеспечения равномерности состава составлял $\sim 20 \text{ K}$ от низа к верху ампулы и $\sim 10 \text{ K}$ – по предполагаемой длине кристалла.

Температурно-временные режимы синтеза устанавливались, ориентируясь на имеющиеся данные по температурам плавления $T_{\text{пл}}$ соединений CFTS и CFTSe [11] с добавкой 20 K. Для об-

разцов, содержащих серу, следовал быстрый нагрев за 4 ч до 848 К, затем до 1123 К за 25 ч. Для соединения $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$, температура плавления которого по литературным данным 1045 К, с учетом сравнительно небольшого избыточного давления селена на таких температурах происходил быстрый нагрев за 4 ч до 973 К и после до 1065 К со скоростью 20 К/ч. Изотермическая выдержка для всех составов – 10 ч. Кристаллизация проводилась со скоростью 5 К/ч до 1023–1093 К в зависимости от состава и далее – со скоростью 20 К/ч до 773 К. Ниже указанной температуры происходило свободное охлаждение. По окончании синтеза для образцов твердых растворов проводился гомогенизирующий отжиг в течение 240 ч при $T = 973$ К. Полученные образцы были крупноблочными, однотонными.

Методы исследования. Элементный состав образцов устанавливали при помощи рентгено-спектрального микроанализа на растровом электронном микроскопе S-4800 (Hitachi, Япония) с приставкой для анализа элементного состава. Кристаллическую структуру определяли методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН 3-М с использованием CuK_α -излучения ($\lambda = 1,5406$ Å). Обработку данных рентгеновской дифракции проводили по методу Ритвельда при помощи программного обеспечения FullProf и XPert-HighScore.

Температуры фазовых превращений определяли посредством дифференциального термического анализа (ДТА). Порошкообразные образцы загружали в небольшие кварцевые сосуды, которые затем вакуумировались. Скорость нагрева составляла 6 К/мин.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты элементного анализа соединения $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ приведены в табл. 1, из которой видно, что с учетом погрешности измерения состав полученных кристаллов близок к расчетному.

Таблица 1. Элементный анализ $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$
Table 1. Elemental analysis $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$

x	Cu, ат.%		Fe, ат.%		Sn, ат.%		S, ат.%		Se, ат.%	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
0	25	24,73	12,5	11,89	12,5	12,72	0	0	50	50,66
0,2	25	24,60	12,5	11,93	12,5	12,90	10	10,80	40	39,77
0,3	25	25,81	12,5	11,34	12,5	12,34	15	13,15	35	37,36
0,5	25	28,26	12,5	13,71	12,5	10,92	25	23,46	25	23,64
0,7	25	27,30	12,5	15,26	12,5	10,26	35	35,26	15	11,93
0,8	25	26,32	12,5	12,71	12,5	11,75	40	39,45	10	11,33
1,0	25	27,69	12,5	13,13	12,5	11,50	50	47,69	0	0

Рентгенограммы системы CFTSSe приведены на рис. 1 (где I – интенсивность; x – состав полученных кристаллов; (112), (220)... – индексы Миллера; θ – угол скольжения). Самым сильным отражением является (112), а относительная высота других отражений указывает на отсутствие предпочтительных ориентаций. Для анализа рентгенограммы был использован метод Ритвельда через программу FullProf.

Установлено, что как соединения, так и твердые растворы CFTSSe обладают тетрагональной структурой станнита пространственной группы $I4_2m$. Из рентгенограмм на рис. 1 четко видно смещение пиков с изменением состава кристаллов. Все дифракционные пики хорошо идентифицируются со структурой станнита CFTS (JCPDF карта № 74-1025).

В литературе присутствуют данные о нескольких структурных модификациях соединения $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$: $I4_2m$ [11, 12] и $P4$ [2, 3]. В [2] на основании данных ДТА наличие двух структурных модификаций поясняется полиморфным превращением при ~974 К, что близко к температуре гомогенизирующего отжига в рассматриваемом в статье случае. Выполняемые в процессе исследований эксперименты по низкотемпературному синтезу твердых растворов неизменно приводили к тому, что химический состав получаемых кристаллов оказывался близок к стехиометрии. Однако образцы были многофазными, исходя из чего можно сделать вывод о стабильности структуры станнита (рис. 2).

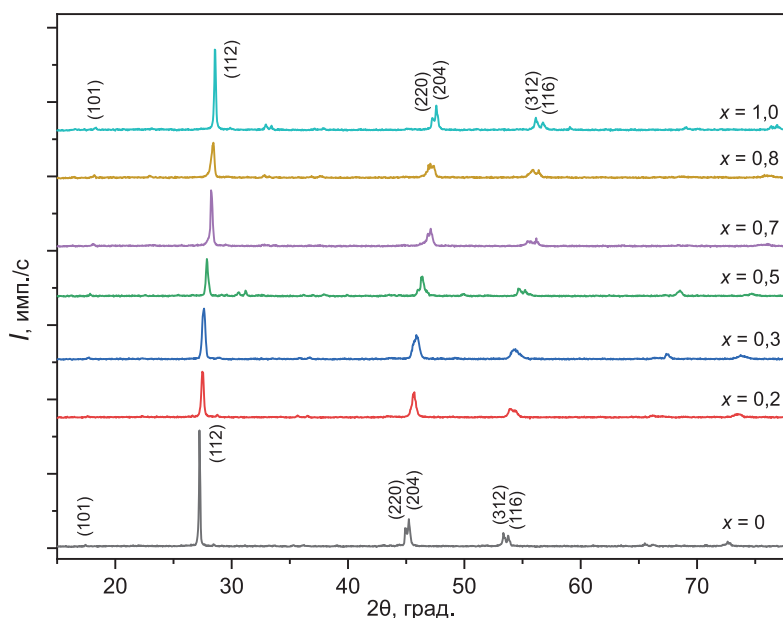


Рис. 1. Рентгенограммы системы CFTSSe
Fig. 1. Radiographs of the CFTSSe system

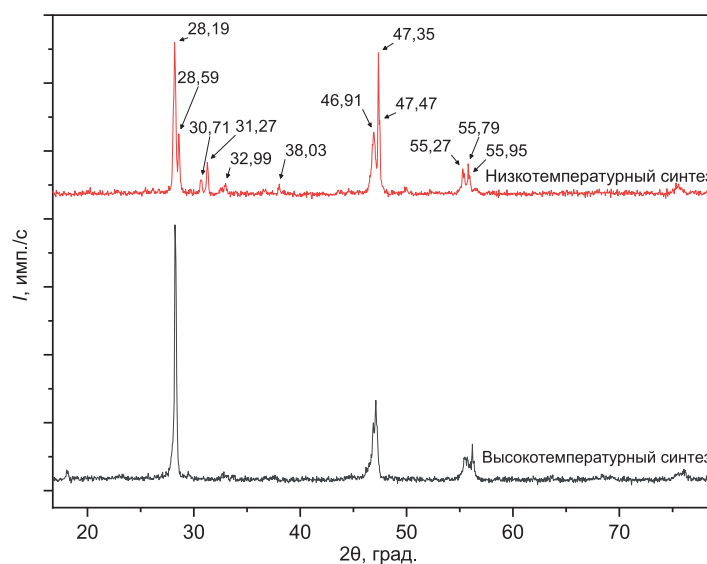


Рис. 2. Пример многофазного образца (сверху) в отличие от завершённого синтеза (снизу) для $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_{0.7}\text{Se}_{0.3})_4$
Fig. 2. Example of a multiphase sample (top) versus completed synthesis (bottom) for $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_{0.7}\text{Se}_{0.3})_4$

Данные рентгенофазового анализа использовались для расчета параметров элементарной ячейки, рентгеновской плотности, объема, a_{eff} . Результаты ДТА и диаграмма состояния системы CFTSSe представлены на рис. 3. Согласно [10], для CFTS $T_{\text{пл}} = 1104$ К и, согласно [13], для CFTSe $T_{\text{пл}} = 951,4$ К. Для твердых растворов по линии на нагрев в точке начала плавления установлены значения солидус, по максимуму кривой плавления – значение ликвидус. По аппроксимации прямолинейного участка кривой на нагрев для соединений установлены температуры плавления, а для твердых растворов определены значения температур, использованных в дальнейшем для расчета температуры Дебая (для простоты восприятия обозначены в табл. 2 единообразно – $T_{\text{пл}}$). При этом с линейным уменьшением параметров кристаллической решетки наблюдается близкое к логарифмическому закону повышение температуры плавления. Между некоторыми фундаментальными параметрами четвертных соединений с тетрагональной решеткой – размеры кристаллической решетки, микротвердость, температура плавления, температу-

ра Дебая и ряд других – могут быть установлены зависимости, также возможно прогнозирование параметров лишь по начальным рентгеновским измерениям.

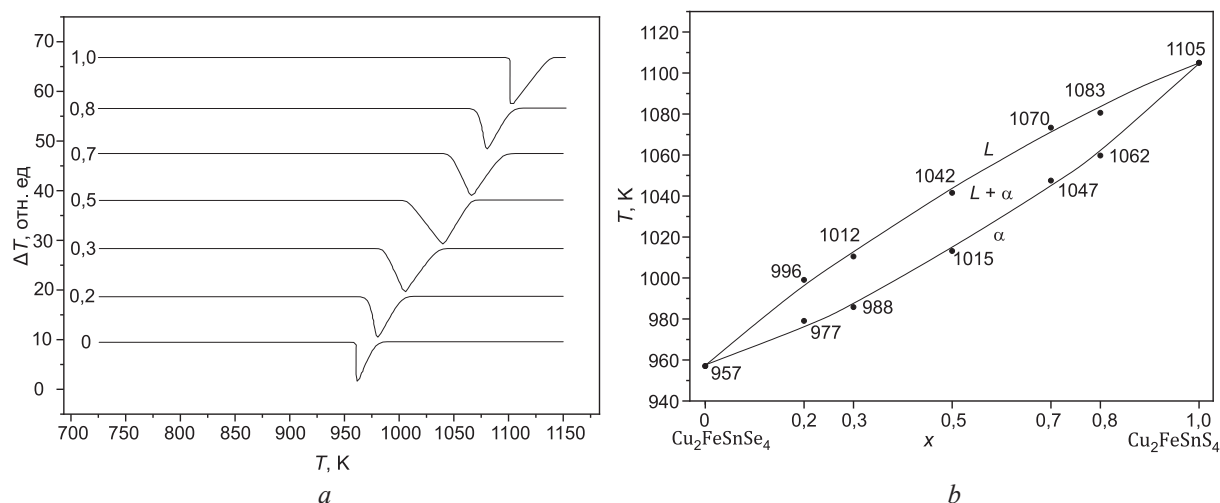


Рис. 3. Результаты дифференциального термического анализа (a) и диаграмма состояния (b) системы CFTSSe

Fig. 3. Results of differential thermal analysis (a) and phase diagram (b) of the CFTSSe system

Температуру Дебая θ_D и скорость звука v_s [14, 15] определяли по следующим формулам:

$$\theta_D = C \left(\frac{T_{\text{пл}}}{\frac{M}{n}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{a_{\text{eff}}} \right); \quad (1)$$

$$v_s = \frac{k_B \theta_D}{\hbar} \left(\frac{V}{16\pi^2} \right), \quad (2)$$

где C – константа, принятая равной 300 по аналогии для четвертных соединений с тетрагональной структурой [10]; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления; M – молярная масса; n – количество атомов, $n = 8$; $a_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\frac{a^2 c}{2}}$; k_B – постоянная Больцмана; $\hbar$ – приведенная постоянная Планка; V – объем элементарной ячейки.

Для определения температуры Дебая θ_D в формуле (1) использовались данные $T_{\text{пл}}$, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Параметры системы $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$
Table 2. Parameters of the system $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$

x	a , Å	c , Å	c/a	V , Å ³	a_{eff} , Å	M , г/моль	D_x , г/см ³	$T_{\text{пл}}$, K	θ_D , K	v_s , $\times 10^5$, см/с
0	5,704	11,26	1,974	366,47	5,679	617,849	5,56	957	186	1,77
0,2	5,652	11,18	1,979	357,38	5,632	579,973	5,35	996	197	1,86
0,3	5,624	11,09	1,971	350,93	5,598	561,215	5,27	1012	204	1,91
0,5	5,581	11,04	1,979	344,22	5,562	532,699	5,10	1042	213	1,99
0,7	5,484	10,85	1,979	326,62	5,466	486,183	4,91	1070	230	2,11
0,8	5,476	10,75	1,963	322,62	5,443	467,425	4,78	1083	237	2,16
1,0	5,441	10,72	1,971	317,63	5,415	429,909	4,46	1105	251	2,28

Зависимости параметров элементарной ячейки a и c и рентгеновской плотности D_x от концентрации вещества x изображены на рис. 4.

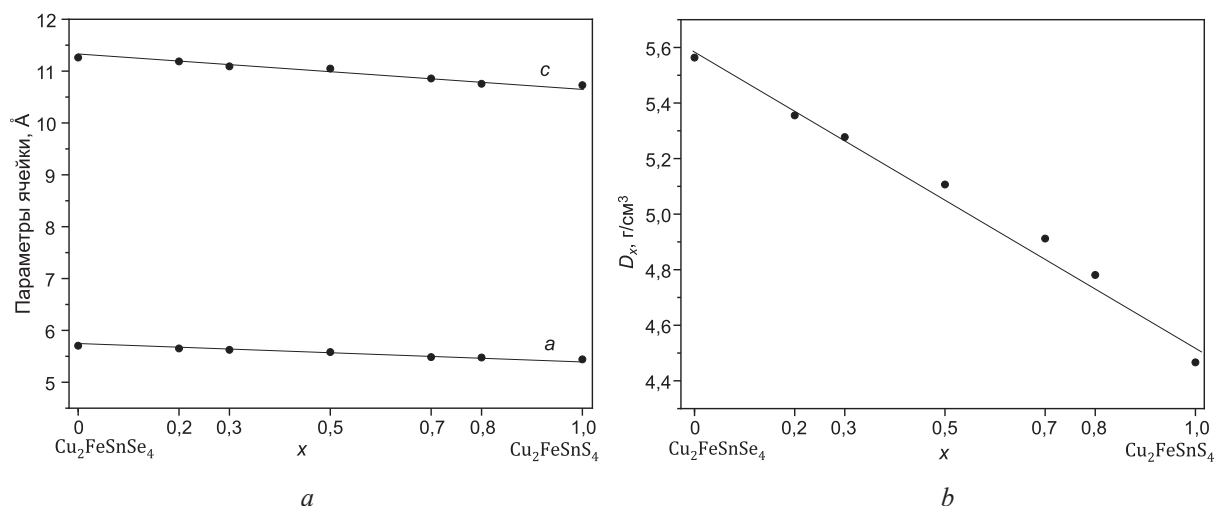


Рис. 4. Зависимости параметров элементарной ячейки (a) и рентгеновской плотности (b) от концентрации системы CFTSSe

Fig. 4. Dependence of the unit cell parameters (a) and X-ray density (b) on the concentration of the CFTSSe system

Для системы твердых растворов соотношение c/a близко к 1,97. По результатам расчетов установлено, что для CFTSSe параметры элементарной ячейки изменяются линейно в соответствии с законом Вегарда. Закономерности изменения параметров a , c , D_x , θ_D для CFTSSe описываются выражениями:

$$a = 5,427 + 0,279(1 - x);$$

$$c = 10,699 + 0,582(1 - x);$$

$$D_x = 4,551 + 1,031(1 - x);$$

$$\theta_D = -151,8 + 8392 \left(M^{-\frac{1}{2}} \right).$$

Заключение

1. Методом однотемпературного синтеза получены образцы объемных кристаллов $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$. Химический состав образцов соответствовал расчетным величинам. Данные рентгенофазового анализа показали, что параметры элементарной ячейки изменяются линейно в соответствии с законом Вегарда: от $a = (5,704 \pm 0,005) \text{ \AA}$ и $c = (11,26 \pm 0,01) \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$ до $a = (5,441 \pm 0,005) \text{ \AA}$ и $c = (10,72 \pm 0,01) \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. Установлены зависимости рентгеновской плотности и температуры Дебая от концентрации серы и селена. Диаграмму состояния системы $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ можно отнести к первому классу по классификации метода Розебома, и она имеет вид, характерный для тетрагональных твердых растворов соединений группы $\text{Cu}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}\text{X}_4^{\text{VI}}$.

2. Исследование выполнено в рамках Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения».

Список литературы / References

1. Jing B., Ji J., Hao L., Yang T., Tan E. (2020) DFT Investigation on the Electronic, Magnetic, Mechanical Properties and Strain Effects of the Quaternary Compound $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. *Crystals*. 10 (6), 1–12. <https://doi.org/10.3390/cryst10060509>.
2. Rincón C., Quintero M., Moreno E., Power Ch., Quintero E., Henao J. A., et al. (2011) X-Ray Diffraction, Raman Spectrum and Magnetic Susceptibility of the Magnetic Semiconductor $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. *Solid State Communications*. 151 (13), 947–951. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2011.04.002>.
3. Xiaolu L., Xianhua W., Daocheng P. (2012) Dilute Magnetic Semiconductor $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Nanocrystals with a Novel Zincblende Structure. *Journal of Nanomaterials*. 12. <https://doi.org/10.1155/2012/708648>.

4. Ghemud, V. S., Jadhav P. R., Kolhe P. T., Shelke P. N., Dahiwalé S. S., Kshirsagar A. (2023) Experimental and Computational Study of $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$: An Emerging Quaternary Semiconductor. *Optical Materials*. 142. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114123>.
5. El Khouja O., Negrila C. C., Nouneh K., Secu M., Ebn Touhami M., Matei E., et al. (2022) Bulk and Surface Characteristics of Co-Electrodeposited $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Thin Films Sulfurized at Different Annealing Temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*. 906. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164379>.
6. Salla J. S., Silvestri S., de Moraes Flores E. M., Foletto E. L. (2018) A Novel Application of $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Particles Prepared by Solvothermal Route as Solar Photo-Fenton Catalyst. *Materials Letters*. 228, 160–163. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.004>.
7. Dhiman V., Kumar S., Kaur M., Sharma R., Chandel T., Bhardwaj D., et al. (2023) Synergistic Effect of Stirring and Marigold Shaped $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Nanostructure for the Enhanced Performance of Rhodamine B Degradation Under Visible Light. *Inorganic Chemistry Communications*. 154. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110923>.
8. Sahoo M. K., Gusain M., Thangriyal S., Nagarajan R., Ranga Rao G. (2020) Energy Storage Study of Trime-tallic Cu_2MSnS_4 (M: Fe, Co, Ni) Nanomaterials Prepared by Sequential Crystallization Method. *Journal of Solid State Chemistry*. 282. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.121049>.
9. Inamdar A. I., Salunke A. S., Hou B., Shrestha N. K., Im H., Kim H. (2023) Highly Durable and Sustainable Copper-Iron-Tin-Sulphide ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$) Anode for Li-Ion Batteries: Effect of Operating Temperatures. *Dalton Transactions*. 34 (52), 12020–12029. <https://doi.org/10.1039/D3DT01338C>.
10. Quintero M., Moreno E., Alvarez S., Marquina J., Rincón C., Quintero E., et al. (2014) Lattice Parameter Values and Phase Transitions for the $\text{Cu}_2\text{-II-IV-S}_4(\text{Se}_4)$ (II=Mn, Fe, Co; IV=Si, Ge, Sn) Magnetic Semiconductor Compounds. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 34 (1), 28–38.
11. Zhou B., Yan X., Li P., Yang L., Yu D. (2015) Raman Spectroscopy as a Superior Tool to Understand the Synthetic Pathway of $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Nanoparticles. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 16, 2690–2694. <https://doi.org/10.1002/ejic.201500189>.
12. Ahmadi S., Khemiri N., Cantarero A., Kanzari M. (2024) Effect of Calcination on the Structural, Morphological and Optical Properties of Earth Abundant $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Powders Prepared by Solid-State Reaction. *Journal of Solid State Chemistry*. 339. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124969>.
13. Quintero M., Barreto A., Grima P., Tovar R., Quintero E., Sánchez Porras G., et al. (1999) Crystallographic Properties of $\text{I}_2\text{-Fe-IV-VI}_4$ Magnetic Semiconductor Compounds. *Materials Research Bulletin*. 34 (14–15), 2263–2270. [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(00\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(00)00166-5).
14. Lindemann F. (1910) About the Calculation of Molecular Own Frequencies. *Physical Magazine*. 11 (14), 609–612.
15. Sánchez Porras G., Quintero M., Wasim. S. M. (1990) Journal of Applied Physics Electrical Properties of $(\text{CuIn})_{1-z}\text{Mn}_{2z}\text{Te}_2$ Alloys. *Applied Physics*. 67 (7), 3382–3386. <https://doi.org/10.1063/1.345349>

Поступила 31.03.2025

Принята в печать 27.06.2025

Received: 31 March 2025

Accepted: 27 June 2025

Вклад авторов

Хорошко В. В. осуществил постановку задачи, выполнил дифференциальный термический анализ и корректировку технологических режимов, провел синтез образцов и анализ экспериментальных результатов.

Осмоловская Т. Н. провела синтез образцов, определила температурно-временные режимы, выполнила обработку и обобщение экспериментальных данных, провела анализ результатов.

Станчик А. В., Пугач Н. Г. осуществили постановку задачи, выполнили обобщение экспериментальных данных, провели анализ результатов.

Дорошкевич А. С. выполнил обработку экспериментальных данных.

Радюш Ю. В. провел рентгенофазовый анализ, осуществил обобщение и верификацию экспериментальных результатов.

Кузьмар И. И. провел элементный анализ, выполнил дифференциальный термический анализ и обработку экспериментальных данных.

Лоско Е. В. провела измерение характеристик твердых растворов.

Authors' contribution

Khoroshko V. V. formulated the problem, performed differential thermal analysis and adjustment of process modes, synthesized samples and analyzed experimental results.

Osmolovskaya T. N. synthesized the samples, determined the temperature-time regimes, processed and summarized the experimental data, and analyzed the results.

Stanchik A. V., Pugach N. G. carried out the problem statement, generalised the experimental data and analysed the results.

Doroshkevich A. S. performed the processing of experimental data.

Radyush Y. V. carried out X-ray phase analysis, generalisation and verification of experimental results.

Kuzmar I. I. conducted elemental analysis, performed differential thermal analysis and processing of experimental data.

Loska A. U. carried out measurements of the characteristics of solid solutions.

Сведения об авторах

Хорошко В. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Осмоловская Т. Н., асп. Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (НПЦ НАН Беларуси)

Станчик А. В., канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр., НПЦ НАН Беларуси

Пугач Н. Г., канд. физ.-мат. наук, проф. департамента электронной инженерии, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Дорoshkevich А. С., канд. физ.-мат. наук, доц., нач. группы сектора исследований, Объединенный институт ядерных исследований

Радюш Ю. В., канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр., НПЦ НАН Беларуси

Кузьмар И. И., канд. техн. наук, доц., зав. лаб. «Импульсный электролиз и многокомпонентные материалы», БГУИР

Лоско Е. В., инж. ОАО «НИИЭВМ», асп. БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 44 737-99-99
E-mail: khoroshko@bsuir.by
Хорошко Виталий Викторович

Information about the authors

Khoroshko V. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Chair of Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Osmolovskaya T. N., Postgraduate of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (SPC NAS of Belarus)

Stanchik A. V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Leading Researcher, SPC NAS of Belarus

Pugach N. G., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Professor of the Department of Electronic Engineering, National Research University Higher School of Economics

Doroshkevich A. S., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Research Sector Group, Joint Institute for Nuclear Research

Radyush Y. V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Leading Researcher, SPC NAS of Belarus

Kuzmar I. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Laboratory "Pulse Electrolysis and Multicomponent Materials", BSUIR

Loska A. U., Engineer at OJSC "NII EVM", Postgraduate of BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 44 737-99-99
E-mail: khoroshko@bsuir.by
Khoroshko Vitaliy Victorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-35-44>

УДК 621.396.218:614.89.086.5

СУММАРНЫЕ УРОВНИ АНТРОПОГЕННОГО И ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА СВЧ НА ТЕРРИТОРИЯХ С ИНТЕНСИВНЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ СОЗВЕЗДИЯМИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ СВЯЗИ

В. И. МОРДАЧЕВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Разработана методика анализа средней интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого у земной поверхности абонентскими терминалами систем спутниковой связи, использующих созвездия низкоорбитальных спутников. С использованием ранее полученных результатов анализа ЭМФ, создаваемого у земной поверхности излучениями космического сегмента этих систем, выполнены оценки суммарных уровней антропогенного и естественного ЭМФ диапазона СВЧ на территориях с интенсивным информационным обслуживанием населения этими системами. Полученные результаты свидетельствуют о том, что излучения абонентских терминалов таких систем вносят основной вклад в интенсивность ЭМФ у земной поверхности, на несколько порядков превышая другие слагаемые ЭМФ, образуемые как естественными источниками микроволнового излучения, так и излучениями множества низкоорбитальных спутников, в целом существенно изменяя физические характеристики среды обитания.

Ключевые слова: низкоорбитальный спутник связи, группировка, электромагнитное излучение, электромагнитный фон, естественный радиопомех, абонентский терминал.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Суммарные уровни антропогенного и естественного электромагнитного фона СВЧ на территориях с интенсивным информационным обслуживанием созвездиями низкоорбитальных спутников связи / В. И. Мордачев, Д. А. Циюненко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 35–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-35-44>.

TOTAL LEVELS OF ANTHROPOGENIC AND NATURAL MICROWAVE ELECTROMAGNETIC BACKGROUND IN AREAS WITH INTENSIVE INFORMATION SERVICING BY CONSTELLATIONS OF LOW-ORBIT COMMUNICATION SATELLITES

VLADIMIR I. MORDACHEV, DZMITRY A. TSYANENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A technique for analyzing the average intensity of electromagnetic background (EMB) created near the earth's surface by subscriber terminals of satellite communication systems which are based on constellations of low-orbit satellites has been developed. Using previously obtained results of analyzing the EMB created near the earth's surface by radiations from the space segment of these systems, estimates have been made of the total levels of anthropogenic and natural EMB in the microwave range in areas with intensive information servicing of the population by these systems. The results obtained indicate that radiation from subscriber terminals of these systems makes the main contribution to the microwave EMB intensity near the earth's surface, exceeding by several orders of magnitude other EMB components created by both natural sources of microwave radiation and radiation from many low-orbit satellites, generally significantly changing the physical characteristics of the habitat.

Keywords: low-orbit communication satellite, constellation, electromagnetic radiation, electromagnetic background, natural radio noise, subscriber terminal.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. (2025) Total Levels of Anthropogenic and Natural Microwave Electromagnetic Background in Areas with Intensive Information Servicing by Constellations of Low-Orbit Communication Satellites. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 35–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-35-44> (in Russian).

Введение

Развертывание в околоземном космическом пространстве мегасозвездий низкоорбитальных спутников связи (НСС) (Starlink, OneWeb, Astra, Kuiper, GuoWang и др.) на два-три порядка увеличивает количество низкоорбитальных источников электромагнитного излучения (ЭМИ) диапазона СВЧ в направлении земной поверхности, одновременно на порядки увеличивая территориальную плотность наземных источников ЭМИ СВЧ, каковыми являются абонентские терминалы (АТ) этих систем спутниковой связи. Ранее авторами была разработана методика анализа и выполнены оценки интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого космическим сегментом подобных систем спутниковой связи (ССС) у земной поверхности, с использованием регистрационных данных ЭМИ НСС (полная излучаемая мощность, характеристики направленности ЭМИ) и их количества в мегасозвездии НСС [1, 2]. Полученные расчетные средние уровни ЭМФ, создаваемого этим сегментом СССР в полосе частот 10–20 ГГц, на два-три порядка превышают уровни естественного ЭМФ [3].

Следует ожидать, что в местах с высокой плотностью населения вклад излучений множества АТ этих систем и наземных шлюзовых станций в интенсивность наземного антропогенного ЭМФ в диапазоне СВЧ по меньшей мере сопоставим с вкладом излучений космического сегмента этих СССР. Поэтому интерес представляет оценивание суммарных уровней ЭМФ в частотном диапазоне функционирования СССР, учитывающих как антропогенные составляющие, обусловленные ЭМИ НСС и АС рассматриваемых систем, так и естественный радишум [3].

Цель исследований – с использованием подходов [4] разработка методики анализа средних уровней ЭМФ, создаваемых у земной поверхности излучениями АТ СССР рассматриваемого вида, и оценка суммарных уровней ЭМФ на основе [1–3], учитывающих все его составляющие (как антропогенные, так и природные), в полосе частот 10–30 ГГц радиоканалов этих систем и во всем диапазоне СВЧ.

Составляющие электромагнитного фона в полосах частот низкоорбитальных спутников связи систем спутниковой связи у земной поверхности

А. Уровни ЭМФ, создаваемого излучениями АТ СССР

Типовые сценарии организации связи в СССР с использованием мегасозвездий НСС, как правило, ориентированы на малоэтажную пригородную застройку, сельскую местность и малонаселенные территории, где высокоскоростная передача данных не может быть обеспечена по волоконно-оптическим линиям связи, и предполагают размещение АТ на относительно небольшой высоте (1–5 м) над земной поверхностью. Анализ характеристик электромагнитной обстановки (ЭМО), создаваемой излучениями АТ в точке наблюдения (ТН), располагаемой на высоте H_{OP} [м] над земной поверхностью (рис. 1), выполнялся при следующих условиях, обеспечивающих пессимистический характер оценок интенсивности ЭМФ в ТН:

- земная поверхность считается плоской, ее сферичность и морфология (неоднородность рельефа, наличие растительности, зданий и сооружений) не учитываются;
- условная плоскость пространственного размещения АТ со средней плотностью ρ_{UE} [АТ/м²] находится над земной поверхностью на высоте H_{UE} [м] подвеса АТ, так что расстояние H между этой плоскостью и плоскостью случайного размещения ТН равно $H_{UE} - H_{OP}$;
- область пространства вокруг ТН, расположенные в которой АТ принимаются во внимание при формировании ЭМО в ТН, ограничивается размерами области радиовидимости АТ из ТН. В качестве критерия радиовидимости АТ (источника электромагнитного поля (ЭМП) с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ) P_e в направлении на ТН) принимается некоторое пороговое значение плотности потока мощности (ППМ) ЭМП Z_0 , соответствующее,

например, чувствительности «по полю» радиоприемных устройств – возможных рецепторов помех, и связанное с радиусом $R_{\max}$ области радиовидимости этого источника из ТН при распространении радиоволн (РРВ) в свободном пространстве:

$$Z_0 = \frac{P_e}{4\pi R_{\max}^2}; \quad (1)$$

– АТ имеют узконаправленные антенны с шириной главных лепестков (ГЛ) в несколько градусов, направленных вверх под углом не менее 25° , поэтому ЭИИМ АТ в направлении на ТН определяется уровнями боковых лепестков (БЛ) излучений АТ.

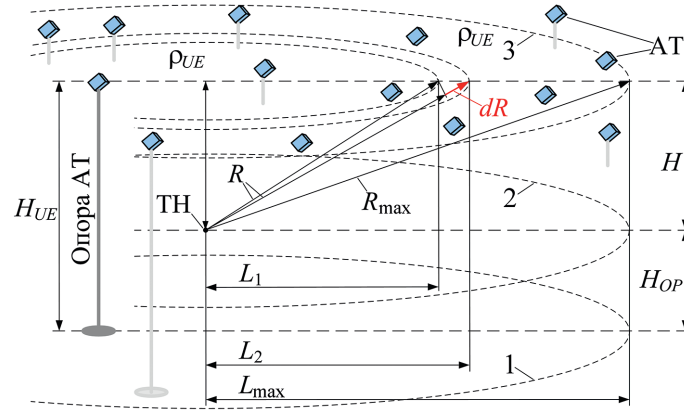


Рис. 1. Пространственное размещение абонентских терминалов и точек наблюдения в системах спутниковой связи с использованием низкоорбитальных спутников связи:
1 – земная поверхность; 2, 3 – условная плоскость размещения точек наблюдения и абонентских терминалов соответственно

Fig. 1. Spatial placement of subscriber terminals and observation points in satellite communication systems using low-orbit communication satellites: 1 – earth's surface; 2, 3 – conventional plane of placement of observation points and subscriber terminals, respectively

Под ЭМО в ТН будем понимать присутствующий в ней некоторый ансамбль N ЭМП АТ с уровнями, превышающими пороговое значение (1). Исследуемой интегральной характеристикой ЭМО в ТН является интенсивность Z_Σ ЭМФ, определяемая в виде скалярной суммы ППМ $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ присутствующих в ней N ЭМП:

$$Z_\Sigma = \sum_{n=1}^N Z_n, \quad Z_n \geq Z_0. \quad (2)$$

Если пространственная плотность АТ – точечных источников ЭМП на условной плоскости, поднятой на высоту H над плоскостью размещения ТН, постоянна ($\rho_{UE} = \text{const}$), то их среднее число в круговой области над ТН, ограниченной некоторым радиусом $R_{\max}$, определяется по формуле

$$N_{\Sigma UE} = \rho_{UE} \pi L_{\max}^2 = \rho_{UE} \pi (R_{\max}^2 - H^2) \approx \rho_{UE} \pi R_{\max}^2,$$

где $L_{\max}$ – радиус, соответствующий области расположения АТ, вклад ЭМП которых учитывается в оценках (2) уровня ЭМФ в ТН.

АТ – точечные источники ЭМП, удаленность которых от ТН не превышает R , распределены равномерно по круговой области плоскости радиусом L_1 на высоте H ; их среднее число:

$$N_{1UE} = \rho_{UE} \pi L_1^2 = \rho_{UE} \pi (R^2 - H^2).$$

АТ, удаленность которых от ТН не превышает $R + dR$, располагаются в круге радиусом L_2 ; их среднее число:

$$\begin{aligned} N_{2UE} &= \rho_{UE} \pi L_2^2 = \rho_{UE} \pi ((R + dR)^2 - H^2) = \rho_{UE} \pi (R^2 + 2RdR + (dR)^2 - H^2) = \\ &= N_{1UE} + \rho_{UE} \pi (2RdR + (dR)^2). \end{aligned}$$

АТ, попадающие в элементарный интервал шириной dR значений удаленности от ТН, находящийся на расстоянии R от этой точки, располагаются в узкой кольцевой области, ограниченной радиусами L_1 и L_2 ; их среднее число в данной области:

$$dN = N_{2UE} - N_{1UE} = \rho_{UE} \pi (2RdR + (dR)^2).$$

Вероятность $p(R, dR)$ попадания значения удаленности некоторого АТ (точечного источника ЭМП, произвольно выбранного из $N_{\Sigma UE}$) в интервал $\{R, R+dR\}$ вычисляется по формуле

$$p(R, dR) = \frac{dN}{N_{\Sigma UE}} = \frac{\rho_{UE} \pi (2RdR + (dR)^2)}{\rho_{UE} \pi (R_{\max}^2 - H^2)} = \frac{2RdR + (dR)^2}{L_{\max}^2}, \quad H \leq R \leq R_{\max} = \sqrt{L_{\max}^2 + H^2}.$$

Плотность распределения вероятности (п.р.в.) $w(R)$ удаленности R произвольно выбранного АТ (точечного источника ЭМИ от ТН) определится соотношением

$$w(R) = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{p(R, dR)}{dR} = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{2RdR + (dR)^2}{L_{\max}^2 dR} = \lim_{dR \rightarrow 0} \frac{2R + dR}{L_{\max}^2} = \frac{2R}{L_{\max}^2}, \quad H \leq R \leq R_{\max}.$$

Иногда удобнее это распределение использовать в следующем виде:

$$w(R) = \frac{2R}{R_{\max}^2 - H^2}, \quad H \leq R \leq R_{\max}. \quad (3)$$

Таким образом, для модели случайного равномерного распределения АТ – источников ЭМП на плоскости, располагаемой на некоторой высоте над плоскостью расположения ТН, п.р.в. удаленности источников от ТН при $R_{\max} \gg H$ практически не зависит от этой высоты, от нее зависит лишь область ее определения.

Для последующего определения п.р.в. ППМ ЭМП, создаваемых излучениями АТ в ТН, необходимо оценить возможность использования в рассматриваемой пространственной модели на рис. 1 зависимости (1), характерной для условий РРВ в свободном пространстве. Эта зависимость теряет адекватность при многолучевом РРВ, характерном при расположении АТ за пределами breakpoint-окрестности ТН радиусом $R_{BP} \geq 4H_{Op}H_{UE}/\lambda$ [5], где λ – длина волны ЭМП. Для ССС с использованием мегасозвездий НСС выделены полосы частот сантиметрового диапазона с $\lambda = 2-3$ см, для которых $R_{BP} \geq 200$ м. В малоэтажной городской застройке в breakpoint-окрестность ТН попадают десятки индивидуальных АТ. При территориально распределенных источниках ЭМП интенсивность ЭМФ в ТН определяется излучениями ближайших источников [6], для которых удаленность от ТН существенно меньше R_{BP} , и условия РРВ в анализируемой модели можно считать соответствующими условиям РРВ в свободном пространстве с зависимостью (1) между ППМ ЭМП Z в ТН и ее удаленностью R от АТ – источника ЭМП с ЭИИМ P_e . Дополнительным аргументом в пользу использования модели (1) для всех источников из области радиовидимости из ТН является существенное рассеяние ЭМП сантиметрового диапазона при их отражении от земной поверхности, в среднем заметно снижающее влияние отраженных от нее лучей на уровни ЭМП.

При монотонной функциональной зависимости (1) $Z = \Phi(R)$ и одинаковой ЭИИМ АТ (квазиизотропные источники ЭМП, $P_e = \text{const}$) п.р.в. $w(Z)$ в ансамбле ЭМП АТ в ТН определяется из (1) и (3) следующим образом [4, 7]:

$$w(Z) = w(R = \Phi^{-1}(Z)) \left| \frac{dR}{dZ} \right|, \quad Z = \Phi(R) = \frac{P_e}{4\pi R^2}, \quad R = \Phi^{-1}(Z) = \left(\frac{P_e}{4\pi Z} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \left| \frac{dR}{dZ} \right| = \left(\frac{P_e}{16\pi} \right)^{\frac{1}{2}} Z^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Очевидно, что область определения значений $Z \in [Z_{\min}, Z_{\max}]$ однозначно связана с областью определения R и зависимостью $Z = \Phi(R)$:

$$Z_{\min} = \frac{P_e}{4\pi R_{\max}^2}; \quad Z_{\max} = \frac{P_e}{4\pi H^2} \rightarrow R_{\max} = \left(\frac{P_e}{4\pi Z_{\min}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad H = \left(\frac{P_e}{4\pi Z_{\max}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае антенны АТ представляют собой достаточно сложные системы – активные фазированные антенные решетки (АФАР) с числом элементов до 2^8 – 2^{10} . Поэтому можно предположить их реализацию с ослаблением задних и боковых лепестков и принять значение P_e ЭИИМ АТ в нижней полусфере с использованием следующей двухуровневой модели диаграммы направленности антенны (ДНА) АТ с коническим лучом ГЛ равной ширины $\Delta\varphi_M$ по азимуту α и зенитному углу β , использованной в [1, 2]:

$$G_{MLM} = \frac{C_{PM}}{(1 + C_{PM}) \sin^2(\Delta\varphi_M/4)}; G_{SLM} = \frac{1}{(1 + C_{PM}) \cos^2(\Delta\varphi_M/4)}; G_{SLRM} = \frac{G_{SLM}}{G_{MLM}} = \frac{\text{tg}^2(\Delta\varphi_M/4)}{C_{PM}};$$

$$C_{PM} = \frac{P_{MLM}}{P_{SLM}}; P_{MLM} + P_{SLM} = P_{TRP}; g_{NM}(\alpha, \beta) = \begin{cases} 1, & \alpha, \beta \in \Delta\Omega_{MLM} = 4\pi - \Delta\Omega_{SLM}; \\ G_{SLRM} = \frac{\text{tg}^2(\Delta\varphi_M/4)}{C_{PM}}, & \alpha, \beta \in \Delta\Omega_{SLM}, \end{cases} \quad (6)$$

где G_{MLM} – коэффициент усиления по ГЛ в его «прямоугольной» модели; G_{SLM} , G_{SLRM} – абсолютный и относительный уровни БЛ; C_{PM} – отношение мощностей, излучаемых по ГЛ (P_{MLM}) и БЛ (P_{SLM}) соответственно; $\Delta\Omega_{MLM}$, $\Delta\Omega_{SLM}$ – телесные углы, соответствующие ГЛ и БЛ; $g_{NM}(\alpha, \beta)$ – нормированная ДНА; P_{TRP} – полная излучаемая мощность (total radiated power, TRP) АТ в определении [8].

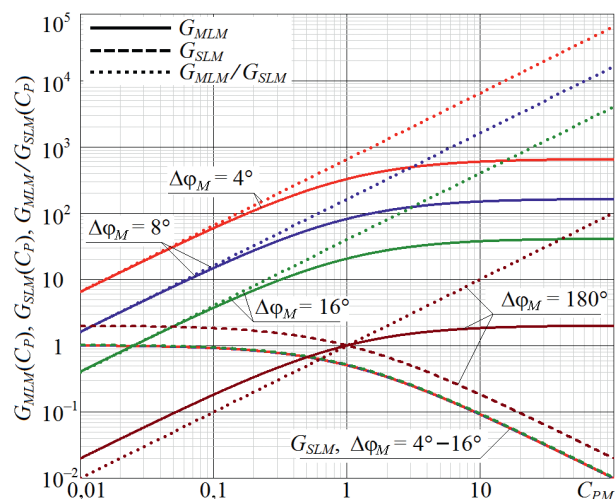
В этой модели по сравнению с ее традиционным представлением в [1, 2] в индексах параметров и характеристик g_{NM} , G_{MLM} , G_{SLM} , G_{SLRM} , C_{PM} , P_{MLM} , P_{SLM} , $\Delta\varphi_M$, $\Delta\Omega_{MLM}$ и $\Delta\Omega_{SLM}$ присутствует символ «М», указывающий на их принадлежность двухуровневой модели ДНА, в которой ширина ГЛ определяется не по половинной мощности (half power beamwidth, HPBW), а соответствует первым нулям ДНА (first null beamwidth, FNBW).

По данным [9, 10], в антеннах с узкими ГЛ их ширина, соответствующая FNBW, в 2,1–2,26 раза превышает его HPBW ($\Delta\varphi_M \approx (2,1\text{--}2,26)\Delta\varphi$), что практически совпадает с соответствующим отношением для ГЛ ДНА вида $(\sin x)/x$. В результате коэффициент усиления модели (6), в которой ширина $\Delta\varphi_M$ ГЛ соответствует FNBW, оказывается примерно в 2,2 раза (3,3–3,5 дБ) меньше по сравнению с коэффициентами усиления по ГЛ по HPBW реальных антенн, что должно быть учтено при выполнении расчетов с использованием (6).

На рис. 2 приведены расчетные зависимости G_{MLM} (сплошные линии), G_{SLM} (пунктирные линии) и отношения G_{MLM}/G_{SLM} (точечные линии) в модели (6) от отношения C_{PM} мощности излучения АТ по ГЛ и БЛ для $\Delta\varphi_M = 4^\circ$ (красные линии), $\Delta\varphi_M = 8^\circ$ (синие линии) и $\Delta\varphi_M = 16^\circ$ (зеленые линии). Для проверки корректности модели указанные расчетные зависимости приведены также для $\Delta\varphi_M = 180^\circ$, которые, как и положено, пересекаются в точке $C_{PM} = 1$; при $C_{PM} \gg 1$ наблюдается $G_{MLM} \rightarrow 2$, $G_{SLM} \rightarrow 0$, и симметрично при $C_{PM} \ll 1$ наблюдается $G_{SLM} \rightarrow 2$, $G_{MLM} \rightarrow 0$. В области реальных значений ширины ГЛ ДНА АТ $\Delta\varphi_M \leq 10^\circ$ уровни боковых лепестков от величины $\Delta\varphi_M$ практически не зависят (пунктирные линии для $\Delta\varphi_M = 4^\circ$ – 16° совпадают), что объясняется незначительностью влияния изменений малого телесного угла $\Delta\Omega_{MLM} = 4\pi - \Delta\Omega_{SLM}$ узкого ГЛ на величину большого телесного угла $\Delta\Omega_{SLM}$.

Рис. 2. Зависимость коэффициентов усиления в модели диаграммы направленности антенны абонентского терминала по главному (G_{MLM}) и боковому (G_{SLM}) лепесткам, их отношений (G_{MLM}/G_{SLM}) от C_{PM}

Fig. 2. Dependence of gain factors in the model of the antenna radiation pattern of the subscriber terminal on the main (G_{MLM}) and side (G_{SLM}) lobes, their (G_{MLM}/G_{SLM}) ratios on C_{PM}



Из приведенных на рис. 2 графиков видно, что, принимая во внимание различие в усилении по ГЛ реальных антенн и двухуровневой модели (6) примерно в 2,2 раза, отношению коэффициентов усиления по ГЛ и БЛ 35–50 дБ, характерному для наиболее совершенных АФАР с оптимизированным распределением токов по апертуре [10], соответствует уровень БЛ (–10)–(–20) дБ по сравнению с изотропным излучением и ЭИИМ примерно $(0,01–0,10)P_{TRP}$ при C_{PM} 10–100 (10–20 дБ).

Если все АТ одинаковы, и их ЭИИМ по БЛ равны ($P_{eSL} = G_{SL}P_{TRP} = P_e$), то, используя (4) и (5), получим выражения для п.р.в. и математического ожидания ППМ ЭМП АТ в ТН:

$$w(Z) = \frac{Z_{\min}Z_{\max}}{(Z_{\max} - Z_{\min})Z^2}; m_1(Z) = \frac{Z_{\min}Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}}, Z_{\min} < Z < Z_{\max}; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{\min}Z_{\max} &= \frac{P_e^2}{16\pi^2 R_{\max}^2 H^2}; \quad Z_{\max} - Z_{\min} = \frac{P_e(R_{\max}^2 - H^2)}{4\pi R_{\max}^2 H^2}; \quad \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = 2 \ln \frac{R_{\max}}{H}; \\ m_1(Z) &= \frac{Z_{\min}Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \ln \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = \frac{P_e}{2\pi(R_{\max}^2 - H^2)} \ln \frac{R_{\max}}{H}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Таким образом, соотношение для средней интенсивности $Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемого в ТН множеством АТ из области радиовидимости, приобретает следующий вид:

$$Z_{\Sigma UE} = N_{\Sigma UE} m_1(Z) = \frac{\rho_{UE} P_e}{2} \ln \frac{R_{\max}}{H} \approx \frac{B_{UESL}}{2} \ln \frac{R_{\max}}{H}; \quad (9)$$

$$B_{UESL} = \rho_{UE} P_e \approx \rho_{UE} P_{TRP} G_{SL} = \frac{\rho_{UE} P_{TRP}}{(1 + C_P) \cos^2(\Delta\phi/4)}, \quad (10)$$

где B_{UESL} – средняя электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая ЭМИ АТ по БЛ.

Соотношения (9), (10) позволяют оценить среднюю интенсивность ЭМФ $Z_{\Sigma UE}$, создаваемого излучениями АТ на условной плоскости размещения ТН при известных ρ_{UE} и P_{TRP} . В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены расчетные зависимости средних уровней ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями АТ, от соотношения C_{PM} мощности излучения АТ по ГЛ и БЛ при различной территориальной плотности ρ_{UE} излучающих АТ и при типовых параметрах ЭМИ АТ, близких к используемым в сети Starlink: ширине ГЛ АТ по HPBW $\Delta\phi = 4^\circ$ ($\Delta\phi_M = 9^\circ$) и $P_{TRP} = 4$ Вт. Анализ зависимостей на рис. 3 позволяет сделать вывод, что средняя интенсивность этой компоненты ЭМФ определяется ближайшими к ТН излучающими АТ (что согласуется с результатами [6]), а потому слабо зависит от высоты $H_{UE} > H_{OP}$, определяющей радиус breakpoint-окрестности R_{BP} вокруг ТН, а также от радиуса зоны радиовидимости $R_{\max}$: его увеличение в 10 раз с 1 до 10 км (что соответствует увеличению на два порядка числа учитываемых в (2) слагаемых при определении суммарного среднего уровня ЭМФ) привело к увеличению расчетного значения интенсивности ЭМФ $Z_{\Sigma BS}$ всего на 1,6 дБ; кривизна земной поверхности, сводящая гипотетическую зону радиовидимости к зоне реальной прямой видимости, делает эту разницу незначительной.

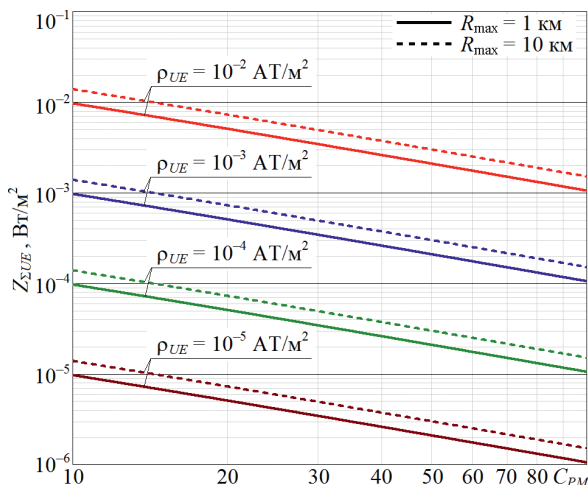


Рис. 3. Зависимость средних уровней электромагнитного фона, создаваемого излучениями абонентских филиалов, от C_{PM} при различной территориальной плотности абонентских филиалов

Fig. 3. Dependence of average levels of electromagnetic background created by radiation from subscriber branches on C_{PM} at different territorial densities of subscriber branches

В. Уровни ЭМФ, создаваемого излучениями НСС CCC

Методика оценки уровней ЭМФ, создаваемого излучениями мегасозвездий НСС у земной поверхности, с использованием регистрационных данных о характеристиках НСС и их группировках, а также на основе прогноза образуемой ими территориальной плотности трафика приведена в [1, 2]. Сравнение расчетных уровней, составляющих ЭМФ, представленных в графической форме на рис. 3, с результатами [1, 2] позволяет сделать вывод, что в местах с интенсивным информационным обслуживанием населения системами рассматриваемого вида вклад ЭМИ АТ в формирование ЭМФ диапазона СВЧ является абсолютно преобладающим.

С. Уровни естественного радишума в полосах частот НСС CCC

При анализе среднего уровня естественного радиочастотного ЭМФ у земной поверхности будем учитывать только следующие его компоненты, определяемые источниками ЭМИ внеземного происхождения [3] (атмосферные эффекты не рассматриваются).

1. Излучение Солнца. Вклад этого компонента в совокупную интенсивность ЭМФ учитывается только в дневные часы. При определении средних уровней естественного ЭМФ рассматривается только «спокойное Солнце»; сильные всплески интенсивности радиочастотного шума, возникающие в периоды солнечной активности, не рассматриваются.

2. Излучение Луны. Вклад этого компонента в совокупную интенсивность ЭМФ учитывается только при наличии Луны над горизонтом и зависит от ее фазы.

3. Галактический шум. Среднее значение его интенсивности определено как усредненное по всему небосводу. Локальные максимумы этого излучения не рассматриваются.

4. Реликтовое излучение (космический фон). Рассматривается как изотропное излучение абсолютно черного тела с температурой 2,7 К.

Совокупность двух последних компонентов образует радишум дальнего космоса (РДК). С использованием [3] получена частотная зависимость спектральной плотности ЭМФ у земной поверхности (рис. 4), создаваемого основными источниками внеземного радишума (суммирование для различных случаев – «день + полнолуние», «ночь + новолуние», космический ЭМФ). ЭМИ Солнца в дневные часы вносит преобладающий вклад в естественный ЭМФ. Интегрирование этих зависимостей по заданной полосе частот позволяет определить усредненное значение интенсивности естественного радиочастотного ЭМФ в данной полосе.

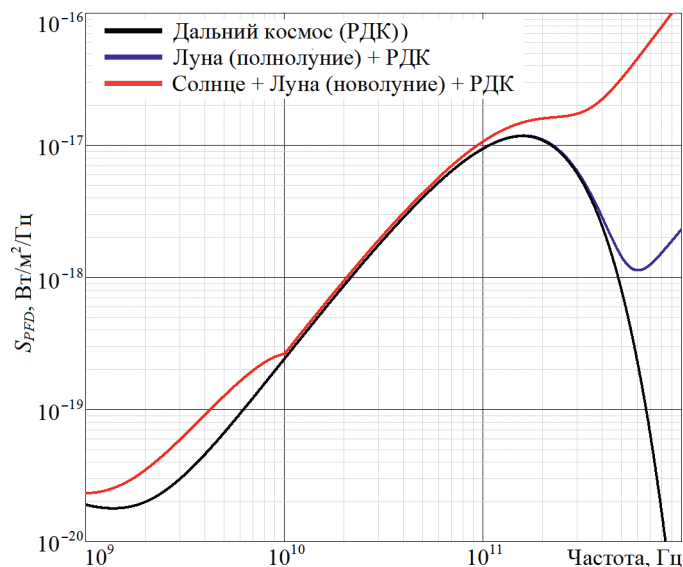


Рис. 4. Спектральная плотность электромагнитного фона у земной поверхности, создаваемого основными источниками внеземного радишума

Рис. 4. Spectral density of the electromagnetic background at the Earth's surface created by the main sources of extraterrestrial radio noise

Сравнительный анализ составляющих совокупного наземного электромагнитного фона, образуемого антропогенными и естественными компонентами

На начальном этапе реализации ССС с использованием мегасозвездий НСС, когда имеет место «пятнистое» покрытие территории лучами ГЛ ЭМИ НСС, сопоставление всех компонентов совокупного ЭМФ у земной поверхности имеет смысл в местах, где они присутствуют одновременно, т. е. в пятне ГЛ ЭМИ НСС. На последующих стадиях реализации ССС, когда созвездие НСС сформировано, и системой обеспечивается полное покрытие территории, первостепенный интерес представляет сопоставление усредненных уровней антропогенных и естественных компонентов ЭМФ и их суммы. В табл. 1 приведены результаты сравнения расчетных значений ППМ в ТН на земной поверхности, расположенной в луче НСС космического сегмента НСС Starlink Gen1, в выделенных этому сегменту ССС полосах частот D_{F1} , D_{F2} , D_{F3} , D_{F4} , с интенсивностью естественного ЭМФ в каждой из этих полос, а также с интегральными уровнями естественного шума в полосе частот 10–30 ГГц, используемой различными ССС, и во всем диапазоне СВЧ. Результаты сравнения расчетных значений усредненной интенсивности составляющих антропогенного ЭМФ, создаваемого излучениями множества НСС и АТ ССС Starlink Gen1 при разном количестве НСС и различной территориальной плотности АТ в ССС, с интенсивностью естественного ЭМФ приведены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты сравнения расчетных значений плотности потока мощности на земной поверхности с интенсивностью составляющих естественного электромагнитного фона в различных полосах частот

Table 1. Results of comparison of calculated values of power flux density on the earth's surface with the intensity of components of the natural electromagnetic background in different frequency bands

Полоса частоты излучения, ГГц	Плотность потока мощности, Вт/м²				$Z_{\Sigma NDF} = Z_{NS} + Z_{NM} + Z_{DS}, \times 10^{-11}$	$Z_{ML}/Z_{\Sigma NDF},$ дБ	$Z_{ML}/Z_{\Sigma N1},$ дБ	$Z_{ML}/Z_{\Sigma N2},$ дБ
	в центре пятна луча $Z_{ML}, \times 10^{-10}$	источников естественного фона, $\times 10^{-11}$						
		Солнце Z_{NS}	Полнолуние Z_{NM}	РДК Z_{DS}				
$D_{F1}: 10,7\text{--}10,94$	1,6–20	0,58	0,02	6,7	$Z_{\Sigma NDF} = 7,3$	3,3–14,4	(–11,2)–(–0,1)	(–11,4)–(–0,3)
$D_{F2}: 12,46\text{--}12,7$	1,6–20	0,77	0,02	8,9	$Z_{\Sigma NDF} = 9,7$	2,0–13,1	(–11,2)–(–0,1)	(–11,4)–(–0,3)
$D_{F3}: 17,8\text{--}18,6$	18–63	5,04	0,15	58,5	$Z_{\Sigma NDF} = 63,7$	4,5–10,0	(–0,5)–4,9	(–0,8)–4,7
$D_{F4}: 18,7\text{--}19,3$	12–39	4,09	0,12	47,5	$Z_{\Sigma NDF} = 51,7$	3,7–8,8	(–2,3)–2,8	(–2,5)–2,6
10,0–30,0 (полосы НСС ССС)		15,6	4,77	182,7	$Z_{\Sigma N1} = 203,1$			
3,0–30,0 (диапазон СВЧ)		19,6	4,95	190,8	$Z_{\Sigma N2} = 215,4$			

Таблица 2. Результаты сравнения усредненной интенсивности составляющих антропогенного электромагнитного фона с интенсивностью естественного электромагнитного фона

Table 2. Results of comparison of the average intensity of the components of the anthropogenic electromagnetic background with the intensity of the natural electromagnetic background

Стадия реализации ССС	Усредненный уровень ЭМФ, создаваемого космическим и наземным сегментами ССС, Вт/м ²				$Z_{\Sigma A} = Z_{\Sigma S} + Z_{\Sigma ST}$, Вт/м ²	$Z_{\Sigma S}/Z_{\Sigma N1}$, дБ $Z_{\Sigma S}/Z_{\Sigma N2}$, дБ	$Z_{\Sigma A}/Z_{\Sigma N1}$, дБ $Z_{\Sigma A}/Z_{\Sigma N2}$, дБ
	ЭМИ НСС $Z_{\Sigma S}$		ЭМИ АТ (14,0–14,5 ГГц, $R_{\max} = 1$ км) $Z_{\Sigma ST}$				
	$P_{TRP} = 20$ дБВт	$P_{TRP} = 25$ дБВт	$C_P = 20$	$C_P = 50$			
$N_{\Sigma} = 10^3$, $\rho_{ST} = 10^{-6}$ АТ/м ²	$4,7 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$(2,1-5,1) \cdot 10^{-7}$	(–6,4)–(–1,3) (–6,6)–(–1,5)	20,1–24,0 19,9–23,7
$N_{\Sigma} = 10^4$, $\rho_{ST} = 10^{-5}$ АТ/м ²	$4,7 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$(2,1-5,1) \cdot 10^{-6}$	3,6–8,7 3,4–8,5	30,1–34,0 29,9–33,7
$N_{\Sigma} = 10^5$, $\rho_{ST} = 10^{-4}$ АТ/м ²	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$(2,1-5,1) \cdot 10^{-5}$	13,6–18,7 13,4–18,5	40,1–44,0 39,9–43,7

Анализ оценок, приведенных в табл. 1, 2, позволяет сделать следующие выводы.

1. В пятне луча НСС на земной поверхности ППМ ЭМИ НСС лишь на 3–14 дБ превышает уровень естественного ЭМФ, при коэффициенте усиления антенны АТ ССС по ГЛ 35–45 дБ этого

достаточно для обеспечения необходимого соотношения сигнал/шум в нисходящем радиоканале. ЭМИ отдельного НСС не оказывает существенного влияния на электромагнитное загрязнение среды обитания, поскольку его ППМ всего на 3–5 дБ превышает уровень естественного ЭМФ в диапазоне СВЧ и, в частности, соответствует категории «Отсутствие опасений» западных стандартов строительной биологии [11, 12].

2. В полосе частот 10–30 ГГц, в которой планируется функционирование ССС с использованием созвездий НСС, уровень естественного ЭМФ определяется РДК, который при $N_{\Sigma} = 10^3$ сопоставим с усредненным уровнем ЭМФ, создаваемого излучениями НСС, но при увеличении N_{Σ} до 10^4 – 10^5 относительный вклад космической антропогенной составляющей ЭМФ по сравнению с РДК увеличивается в 10–100 раз (на 10–20 дБ).

3. ЭМФ, создаваемый излучениями АТ ССС, вносит определяющий вклад в интенсивность совокупного ЭМФ, на несколько порядков превышая уровни составляющих ЭМФ, создаваемого естественным радиошумом и излучениями множества НСС.

Заключение

1. Интенсивность у земной поверхности электромагнитного фона диапазона СВЧ, создаваемого излучениями систем спутниковой связи на основе мегасозвездий низкоорбитальных спутников связи, определяется излучениями абонентских филиалов, вносящими определяющий вклад в интенсивность совокупного электромагнитного фона, на несколько порядков превышая уровни составляющих электромагнитного фона, создаваемого естественным радиошумом и излучениями множества низкоорбитальных спутников связи. При высокой интенсивности использования абонентских терминалов, когда реальная средняя территориальная плотность излучающих абонентских терминалов может достигать 10^2 – 10^3 АТ/км², средний уровень электромагнитного фона, создаваемого излучениями рассматриваемых систем спутниковой связи, по меньшей мере на два порядка меньше уровня 0,1 Вт/м², принятого в качестве предельно допустимого уровня радиочастотных электромагнитных полей для населения, но на 30–45 дБ превышает уровень естественного электромагнитного фона диапазона СВЧ.

2. Планируемое интенсивное информационное обслуживание общества значительным количеством систем спутниковой связи различной принадлежности, при котором общее число функционирующих низкоорбитальных спутников связи может достигать 10^5 , способно быть причиной существенного микроволнового электромагнитного загрязнения среды обитания, уровни которого соответствуют категории «Серьезные опасения при постоянном облучении более 4 часов в сутки в помещении» западных стандартов строительной биологии [11, 12], где уровни радиочастотных электромагнитных полей этой категории определены как «Неприемлемые с точки зрения строительной биологии. Они неестественны для человека. Хроническое воздействие этих уровней может быть причиной будущих нарушений здоровья».

3. Работа выполнена в рамках научного проекта № 23-3172 при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь.

Список литературы / References

1. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Tsyankenka D. A. (2024) Prediction the Level of the Electromagnetic Background Created by Constellations of Satellites Near the Earth's Surface Using Registration Data. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 43–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-43-52> (in Russian).
2. Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. (2025) Analysis of the Electromagnetic Background Created by Constellations of Low-Earth Orbit Satellites, Based on the Prediction Forecast of the Created Area Traffic Capacity. *Doklady BGUIR*. 23 (3), 36–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-36-45> (in Russian).
3. Radio Noise. *Rec. ITU-R P.372-16*. 2022.
4. Mordachev V. I. (2024) Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Radiation Biology. Radioecology*. 64 (3), 305–322.
5. Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz. *Rec. ITU-R P.1411-11*.
6. Mordachev V., Loyka S. (2009) On Node Density – Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 27 (7), 1120–1131.
7. Mordachev V. (2009) *System Ecology of Cellular Communications*. Belarus State University Publishers. https://emc.bsuir.by/m/12_116413_0_176480.pdf (in Russian).
8. CEPT Report 67, July 6, 2018. <https://docdb.cept.org/>.

9. Balanis C. A. (2016) *Antenna Theory Analysis and Design*. Wiley.
10. Mailloux R. J. (2005) *Phased Array Antenna Handbook*. Artech House.
11. *Baubiologie MAES. Standard of Building Biology Testing Methods*. Inst. Building Biol. + Sustainability IBN. Rosenheim, Germany, Tech. Rep. SBM-2008.
12. *Guideline of the Austrian Medical Association for the Diagnosis and Treatment of EMF-Related Health Problems and Illnesses (EMF Syndrome), Standard*. 2012. 1–17. Available: <https://www.magdahas.com/wp-content/uploads/2012/06/Austrian-EMF-Guidelines-2012.pdf>.

Поступила 12.02.2025

Принята в печать 28.05.2025

Received: 12 February 2025

Accepted: 28 May 2025

Вклад авторов

Мордачев В. И. осуществил постановку задачи, разработал методику анализа электромагнитного фона, создаваемого низкоорбитальными спутниками связи и абонентскими терминалами, выполнил расчеты рис. 2, 3 и табл. 2, анализ результатов, подготовил рукопись статьи.

Ционенко Д. А. разработал методику анализа электромагнитного фона, создаваемого внеземными источниками электромагнитного излучения, выполнил расчеты рис. 4 и табл. 1, принял участие в обсуждении полученных результатов.

Authors' contribution

Mordachev V. I. formulated the problem, developed a methodology for analyzing the electromagnetic background created by low-orbit communication satellites and subscriber terminals, performed the calculations in Fig. 2, 3 and Tab. 2, analyzed the results, and prepared the manuscript.

Tsyankenka D. A. developed a method for analyzing the electromagnetic background created by extraterrestrial sources of electromagnetic radiation, performed the calculations in Fig. 4 and Tab. 1, and took part in the discussion of the results obtained.

Сведения об авторах

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ 1.7), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ционенко Д. А., канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. НИЛ 1.7, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Information about the authors

Mordachev V. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radio-Electronic Equipment” (Lab 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Tsyankenka D. A., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Senior Researcher at the Lab 1.7, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-45-52>

УДК 621.391.13

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ И ВЕЩАНИЯ С ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫМ БЛОЧНЫМ КОДИРОВАНИЕМ И МНОГОПОЗИЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Э. Б. ЛИПКОВИЧ, Н. И. БЕЛЕНКЕВИЧ, М. И. ЗОРЬКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Представлены методика расчета и аналитические соотношения для определения эффективности использования помехоустойчивого канального кодирования в системах с двоичным блочным кодом Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ), *M*-позиционной модуляцией и декодированием по алгоритму Витерби с мягким решением (SOVA). Использовался обобщенный показатель эффективности декодирования, который учитывал параметры кода, формат модуляции и режим работы декодера. По сравнению с известной методикой, предложенная не требует знания весовых составляющих спектра кода и применения при расчетах процедур компьютерного моделирования. Полученные аналитические соотношения представлены в компактном и общем для исследований виде. Они служат для расчета помехоустойчивости, энергетического выигрыша от кодирования, исправляющей способности декодера и информационной эффективности каналов связи при вариации параметров кодов и вероятностей ошибок на выходе декодера.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, эффективность декодирования, исправляющая способность декодера, вероятность ошибки на бит.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Липкович, Э. Б. Методика расчета энергетической эффективности систем связи и вещания с помехоустойчивым блочным кодированием и многопозиционной модуляцией / Э. Б. Липкович, Н. И. Беленкевич, М. И. Зорько // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 45–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-45-52>.

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE ENERGY EFFICIENCY OF COMMUNICATION AND BROADCASTING SYSTEMS WITH NOISE-IMMUNE BLOCK CODING AND MULTI-POSITION MODULATION

EDUARD B. LIPKOVICH, NATALIA I. BELENKEVICH, MIKHAIL I. ZORKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents a calculation method and analytical relationships for determining the efficiency of using error-correcting channel coding in systems with a binary block code of Bose – Chaudhuri – Hocquenghem (BCH), *M*-position modulation and decoding using the Viterbi algorithm with a soft decision (SOVA). A generalized decoding efficiency indicator was used, which took into account the code parameters, modulation format and decoder operating mode. In comparison with the known method, the proposed method does not require knowledge of the weight components of the code spectrum and the use of computer modeling procedures in calculations. The obtained analytical relationships are presented in a compact form and general for research. They are used to calculate the error immunity, energy gain from coding, the correcting ability of the decoder and the information efficiency of communication channels with variations in code parameters and error probabilities at the decoder output.

Keywords: error-correcting coding, decoding efficiency, decoder error correction capability, bit error probability.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Lipkovich E. B., Belenkevich N. I., Zorka M. I. (2025) Methodology for Calculating the Energy Efficiency of Communication and Broadcasting Systems with Noise-Immune Block Coding and Multi-Position Modulation. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 45–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-45-52> (in Russian).

Введение

Помехоустойчивое канальное кодирование на основе двоичных корректирующих кодов Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ) получило широкое применение в беспроводных локальных сетях, в цифровых системах мобильной связи, наземного и спутникового вещания. Двоичные коды БЧХ представляют собой большой класс линейных циклических кодов (совершенные, расширенные, укороченные и др.), которые исправляют кратные ошибки, возникающие при передаче сообщений по каналам связи с шумами. Данный вид кодов используется в однокаскадных и составных кодовых конструкциях, предусматривающих последовательное или параллельное (турбокоды) включение в схему отдельных кодов для повышения эффективности декодирования и достоверности приема [1–3]. Полученный выигрыш от кодирования позволяет снизить мощность передатчика, размеры антенн или увеличить скорость передачи данных.

БЧХ-коды записываются в виде (n, k, d) , где $n = 2^p - 1$ – общее число символов в блоке или длина кодового слова; k – число информационных символов; $d \geq \lfloor 2t + 1 \rfloor$ – минимальное кодовое расстояние, равное минимальному числу символов, на которые отличается любая пара кодовых слов; $t \geq \lfloor (n - k)/p \rfloor$ – количество исправляемых ошибок; $R = k/n$ – кодовая скорость; $r = n - k$ – число проверочных символов; 2^k – число кодовых слов; p – целое число; $\lfloor x \rfloor$ – целая часть числа x . Расширенные коды с одной дополнительной проверкой на четность записываются в виде $(n + 1, k, d + 1)$, а укороченные – в виде $(n - z, k - z, d_z)$, где z – глубина укорочения ($0 \leq z < k$); $d_z \geq d$.

Большинство выполненных исследований систем с БЧХ-кодами связано с использованием в кодовых конструкциях различных способов декодирования с жестким решением, включая классическое декодирование по алгоритму Витерби [1, 2]. С развитием теории помехоустойчивого кодирования и средств реализации возрос интерес к декодерам Витерби с мягким решением (Soft-Output Viterbi Algorithm, SOVA), которые вычисляют не только наиболее вероятностные кодовые слова, но и оценивают надежность их символов. Для этого производится многоуровневое квантование демодулированных сигналов, двунаправленное декодирование по алгоритму Витерби (вперед-назад) и определение логарифма отношения правдоподобия (Log-Likelihood ratio, LLR) [2]. Переход от декодирования с жестким решением к мягкому способствует заметному улучшению энергетических показателей систем с кодированием и росту достоверности приема. Вместе с тем для проведения расчета характеристик кодовых конструкций требуются дополнительные теоретические исследования.

В [2] для систем с двоичным кодом БЧХ, модуляцией BPSK и декодированием с мягким решением приведена следующая верхняя граница вероятности ошибки $P_{бб}$:

$$P_{бб} \leq \sum_{w=d}^n (WA_w/n) Q(\sqrt{2WRh'_{кб}}), \quad (1)$$

где W – вес кодового слова; A_w – весовой коэффициент спектра кода (ВКСК), равный числу кодовых слов веса W ; $h'_{кб} = E_0/N_0$ – отношение средней энергии сигнала E_0 на бит к спектральной плотности мощности шума N_0 базовой модели расчета; $Q(z)$ – функция ошибок.

Согласно (1), для выполнения вычислений необходимо знание всех ВКСК, обеспечивающих сходимость данного ряда. Однако не для всех кодов известны значения A_w или их весовые функции, по которым определяются ВКСК [1, 2]. Поэтому расчет коэффициентов A_w осуществляется по сложным методикам и алгоритмам с табулированием полученных результатов. В [2] приведен перечень значений ВКСК для расширенных кодов БЧХ с n от 8 до 128, величина которых заметно растет с увеличением длины кода и веса W . В частности, первые значения A_w для четного веса W кода (64, 57, 4) составляют $A_4 = 10416$, $A_6 = 1166592$, $A_8 = 69194232$, для кода (128, 64, 22) – $A_{22} = 243840$, $A_{24} = 6895268$, $A_{26} = 107988608$. Вместе с тем даже при знании всех значений A_w выразить из (1) требуемую расчетную зависимость энергетической эффективности $h'_{кб}$ от $P_{бб}$

затруднительно. Поэтому вычисления по (1) проводятся с привлечением процедур компьютерного моделирования и последующего представления полученных результатов в виде графических зависимостей, что исключает возможность теоретического анализа и расчета характеристик систем в замкнутом виде.

Цель исследования – получение аналитических соотношений для расчета показателей эффективности систем связи и вещания, использующих двоичные коды БЧХ, многопозиционные виды модуляции и декодирование по алгоритму SOVA без необходимости определения весовых коэффициентов спектра кода и применения процедур компьютерного моделирования. Предусматриваются использование каналов связи с аддитивным белым гауссовским шумом и когерентная демодуляция сигналов с многоуровневым квантованием.

Аналитические модели расчета

Для получения аналитических расчетных соотношений применительно к системам с M -позиционной модуляцией и однокаскадным двоичным БЧХ-кодированием использовалось уравнение взаимосвязи между вероятностью ошибки на выходе декодера Витерби с мягким решением и значением отношения сигнал/шум (ОСШ) на его входе [3–5]

$$P_b = (C_i \mu_i / (q_i R)) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\mu_i h'_k}), \quad (2)$$

где C_i – параметр, зависящий от требуемого формата (вида и порядка) модуляции; μ_i – обобщенный показатель эффективности декодирования; $q_i = d_0^2 / (4E_0)$ – квадрат коэффициента помехоустойчивости системы с многопозиционной модуляцией; d_0 – максимальное евклидово расстояние между вершинами амплитуд сигнала созвездия; i – индекс, указывающий на используемый вид модуляции; $\operatorname{erfc}(z)$ – дополнительный интеграл вероятности

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-u^2) du \cong \frac{1}{z\sqrt{\pi}} 10^{-z^2/2,3}. \quad (3)$$

Введенный в (2) обобщенный показатель μ_i учитывает принятый формат модуляции, скорость кода R , кодовое расстояние d и множитель эффективности декодирования β

$$\mu_i = q_i R d \beta. \quad (4)$$

Расчетные формулы для определения параметров C_i и q_i с различными видами модуляции и кратностью $m = \log_2 M$ приведены в [4]. В статье ограничимся значениями для КАМ-М и ФМ-М:

$$C_1 = 2(1 - 1/\sqrt{M})/m; \quad q_1 = 3m/(2(M-1)), \text{ для КАМ-М с четными } m = 2, 4, 6, \dots; \quad (5)$$

$$C_2 = 2/m; \quad q_2 = 3m/(1,9(M-0,5)), \text{ для КАМ-М с нечетными } m = 3, 5, 7, \dots; \quad (6)$$

$$C_3 = 0,5; \quad q_3 = 1, \text{ для ФМ-2 (BPSK) } m = 1; \quad (7)$$

$$C_4 = 1/m; \quad q_4 = m \sin^2(\pi/M), \text{ для ФМ-М с } m \geq 2. \quad (8)$$

Согласно (5)–(8), для низкоформатных видов модуляции (BPSK, КАМ-4, ФМ-4) $q_i = 1$ и $C_i = 0,5$. При использовании полосноберегающих видов модуляции с ростом M значения q_i и C_i снижаются, что приводит к уменьшению μ_i .

Сравним между собой выражения (1) и (2) при условии использования в (1) только одного коэффициента A_W минимального веса $W = d$, что справедливо при $P_b \rightarrow 0$ [6]. С учетом стандартного определения $Q(z) = 0,5 \operatorname{erfc}(z/\sqrt{2})$ и приближения (3) зависимости (1) и (2) приводятся к виду:

$$P_{bB} = \left[0,5 A_W \sqrt{d} / (n \sqrt{R \pi h'_{kB}}) \right] \cdot 10^{-R d h'_{kB} / 2,3}; \quad (9)$$

$$P_b = \left[C_i \sqrt{\mu_i} / (q_i R \sqrt{\pi h'_k}) \right] \cdot 10^{-\mu_i h'_k / 2,3}. \quad (10)$$

Приняв $h'_{kB} = h'_k$, $C_i = 0,5$ и $q_i = 1$, в результате сравнения (9) и (10) получим

$$\lg(A_w/n) = [Rdh'_k(1-\beta)/2,3] + \lg(\sqrt{\beta}). \quad (11)$$

Из (11) следует, что вместо выражения (9), требующего знания A_w , можно использовать (10) с множителем β , входящим в μ_i , и исключить определение ВКСК в расчетах.

Для систем с двоичным БЧХ-кодированием множитель β определяется следующим образом:

$$\beta = 1 / \left(\left(1 + \frac{\lg(Rd)}{-\lg P_b} \right) \cdot \left(1 + \chi \left(\frac{\lg(Rd)}{-\lg P_b} + H \right) \right) \right), \quad (12)$$

$$\chi = (1+R) \cdot \lg \left[(R(2R + \lg(Rd))Rd) / (1-R) \right], \quad H = (1+R)(\lg(Rd)) \cdot \exp(\lg P_b).$$

Согласно (12), множитель β зависит только от параметров кодов и требуемых значений P_b на выходе декодера. Его величина может изменяться от единицы при $P_b \rightarrow 0$ ($-\lg P_b \rightarrow \infty$, $\exp(\lg P_b) \rightarrow 0$) до значений, близких к нулю при грубых ошибках. Снижение β с ростом P_b приводит к уменьшению показателя μ_i и, следовательно, к уменьшению энергетической эффективности систем с увеличением уровня ошибок.

Для подтверждения возможной замены (9) на (10) выразим из этих формул требуемые зависимости ОСШ в функции P_b . Применив к (9) и (10) логарифмирование и метод последовательных приближений, получим расчетные соотношения для прямого определения энергетической эффективности систем:

– для базовой модели расчета

$$h_{кБ} = 10 \lg \left[2,3 \cdot \left(B - \lg \left(\sqrt{2,3(B - V_B) / (Rd)} \right) \right) / (Rd) \right], \quad V_B = \lg \left(\sqrt{2,3B / (Rd)} \right); \quad (13)$$

$$B = -\lg(P_b) + \lg \left((0,5 A_w / n) \sqrt{d / (R\pi)} \right); \quad (14)$$

– для предложенной модели

$$h_k = 10 \lg \left[2,3 \cdot \left(D - \lg \left(\sqrt{2,3(D - V_D) / \mu_i} \right) \right) / \mu_i \right], \quad V_D = \lg \left(\sqrt{2,3D / \mu_i} \right); \quad (15)$$

$$D = -\lg(P_b) + \lg \left(C_i \sqrt{(d\beta) / (q_i R\pi)} \right). \quad (16)$$

Анализируя (13)–(16), можно установить, что для незначительных ошибок ($P_b \rightarrow 0$) величины D и B сравнимы, показатель эффективности $\mu_i \rightarrow Rd$ и значения $h_{кБ}$ и h_k равнозначны. С ростом P_b величины $D < B$, $\mu_i < (Rd)$ и расхождения между $h_{кБ}$ и h_k увеличиваются.

В табл. 1 приведены результаты расчетов $h_{кБ}$, h_k и $\delta = h_k - h_{кБ}$ при использовании модуляции КАМ-4, четырех видов расширенных кодов БЧХ с известными для них коэффициентами A_w и трех значений P_b (10^{-2} , 10^{-6} , 10^{-12}).

Таблица 1. Значения отношения сигнал/шум и δ в зависимости от параметров БЧХ-кодов и P_b
Table 1. Signal-to-noise ratio and δ values depending on the BCH code parameters and P_b

Параметр	Значения параметров кодов, коэффициентов спектров A_w и вероятностей ошибок P_b											
	Код (32, 16, 8) $A_8 = 620$			Код (64, 30, 14) $A_{14} = 8064$			Код (64, 57, 4) $A_4 = 10416$			Код (128, 64, 22) $A_{22} = 243840$		
	10^{-2}	10^{-6}	10^{-12}	10^{-2}	10^{-6}	10^{-12}	10^{-2}	10^{-6}	10^{-12}	10^{-2}	10^{-6}	10^{-12}
h_k , дБ	2,987	6,076	8,707	2,304	4,524	6,88	4,066	6,894	9,396	1,750	3,026	5,048
$h_{кБ}$, дБ	2,674	6,07	8,704	1,683	4,511	6,89	3,890	6,930	9,409	0,623	2,937	5,050
δ , дБ	0,313	0,006	0,003	0,621	0,013	−0,01	0,176	−0,036	−0,013	1,127	0,089	−0,002

Из табл. 1 видно, что при $P_b \leq 10^{-6}$ различия в значениях $h_{кБ}$ и h_k незначительные ($\delta \leq 0,1$ дБ), и этот результат свидетельствует о равнозначности сравниваемых формул (13) и (14) и (15) и (16) в области малых вероятностей ошибок. При $P_b = 10^{-2}$ различия в уровнях ОСШ растут, что можно объяснить принятым ограничением числа учитываемых ВКСК в (13) и (14). Для подтверждения данного положения вычислены зависимости $h_{кБ} = \psi(P_b)$ с учетом требуемого числа ВКСК для сходимости ряда (1). Расчеты показали хорошее соответствие между полученными значе-

ниями $h_{кБ}$ и всеми приведенными в табл. 1 величинами h_k для принятых вероятностей ошибок, включая $P_b = 10^{-2}$.

Для полноты анализа рассматриваемых систем с кодированием на основании (15), (16) рассчитаны зависимости $h_k = \psi(P_b)$ для совершенных, укороченных, примитивных и других типов двоичных БЧХ-кодов. Сравнение полученных зависимостей с вычисленными по (1) показало, что средняя погрешность для кодов с длиной n от 8 до 128 при $P_b = 10^{-6}$ составляет менее 0,1 дБ. Этот результат свидетельствует об эффективности предложенной альтернативной модели исследований характеристик систем с БЧХ-кодированием и декодированием по алгоритму SOVA. Полученные соотношения (15), (16), в отличие от (1), не требуют знания коэффициентов A_w , представлены в прямом для определения энергетической эффективности виде и учитывают показатели q_i и C_i для расчета систем с M -позиционной модуляцией.

Если в (15), (16) принять $\mu_i = q_i$ и $R = 1$, то получим расчетные соотношения для определения ОСШ системы с M -позиционной модуляцией при отсутствии кодирования:

$$h_0 = 10 \lg \left[2,3 \cdot \left(A - \lg \left(\sqrt{2,3(A - V_A)/q_i} \right) \right) / q_i \right], \quad V_A = \lg \left(\sqrt{2,3A/q_i} \right); \quad (17)$$

$$A = -\lg(P_{b0}) + \lg(C_i / \sqrt{q_i \pi}), \quad (18)$$

где P_{b0} – вероятность ошибки в канале связи на стороне приема (на выходе демодулятора).

Согласно (17), (18) и (5)–(8), с ростом порядка модуляции значения q_i и C_i снижаются и увеличиваются значения ОСШ, при которых обеспечивается заданная достоверность приема.

Для систем с кодированием характерно, что по мере увеличения избыточности $n(1 - R)$ в кодах уменьшается кодовая скорость R и растет вероятность ошибки на входе декодера

$$P_{bвх} = \left(C_i / \sqrt{q_i R \pi h_k'} \right) \cdot 10^{-(q_i R h_k')/2,3}. \quad (19)$$

Рост $P_{bвх}$ снижает эффективность декодирования и увеличивает требования к корректирующей способности устройств для компенсации ошибок на выходе декодера. Диапазон возможного изменения значений R в системах с БЧХ-кодированием составляет от $R = \lceil n/(n+1) \rceil$ для расширенных кодов проверки на четность $(n+1, n, 2)$ до $R = 1/n$ для кодов повторения $(n, 1, n)$. На основании (2) и (19) исправляющая способность декодера определяется по формуле

$$И = P_{bвх}/P_b = \left(1/\sqrt{d\beta} \right) \cdot 10^{(q_i R h_k' (d\beta-1))/2,3}. \quad (20)$$

Согласно (20), величина $И$ зависит от многих факторов, в том числе от порядка модуляции, скорости кода и параметров декодирования, определяемых уровнем ошибок и значением β . При условии $d\beta \leq 1$ исправление ошибок отсутствует. Для повышения корректирующей способности декодера необходимо использовать длинные коды с большим значением d , что позволит противостоять снижению множителя β с ростом ошибок.

Основываясь на (15)–(18), представим общее аналитическое выражение для определения энергетической эффективности систем при кодировании относительно режима без кодирования при $P_b = P_{b0}$ и разных для них форматов модуляции

$$\Delta G_{FM} = h_{0F} - h_{kM} \cong 10 \lg \left[\left(q_{iM} R d \beta / q_{iF} \right) \left(1 - \frac{\lg(C_{iM} d \beta / C_{iF})}{-\lg P_b} \right) \right], \quad (21)$$

где h_{0F} , h_{kM} – уровни ОСШ при отсутствии и наличии кодирования в сравниваемых системах с F и M (порядками модуляции соответственно), дБ; q_{iF} , C_{iF} , q_{iM} , C_{iM} – параметры, зависящие от формата модуляции (5)–(8).

Выражение (21) является удобной расчетной моделью для определения ΔG_{FM} -систем с ограниченной полосой пропускания, которые предусматривают использование полосноберегающих видов модуляции для обеспечения спектральной эффективности. Например, при расчете характеристик систем с КАМ-4 в отсутствие кодирования ($q_{iF} = 1$; $C_{iF} = 0,5$) и КАМ-64 с БЧХ-кодированием (код (128, 64, 22); $R = 0,5$; $d = 22$, $\beta = 0,628$; $q_{iM} = 1/7$, $C_{iM} = 0,2917$) при $P_b = 10^{-6}$ полу-

чим, что выигрыш в использовании полосы $\log_2(M)R/\log_2(F)=1,5$ и величина $\Delta G_{FM} = -0,769$. Последнее означает, что при незначительных потерях в ΔG_{FM} обеспечен выигрыш в использовании полосы пропускания в 1,5 раза.

Если в (21) принять для сравниваемых систем при отсутствии и наличии кодирования $F = M$, то энергетический выигрыш от кодирования (ЭВК), характеризующий уровень снижения ОСШ за счет кодирования, рассчитывается по формуле

$$\Delta G = h_0 - h_k \cong 10 \lg \left[Rd\beta \left(1 - \frac{\lg(d\beta)}{-\lg P_b} \right) \right]. \quad (22)$$

Из (22) следует, что ΔG может принимать как положительные, так и отрицательные значения. При условии

$$-\lg(P_b) = \lg(d\beta)/(1 - 1/(Rd\beta)) \quad (23)$$

величина $\Delta G = 0$, $h_0 = h_k$, и выигрыш от кодирования отсутствует. В области грубых ошибок $\Delta G < 0$ дБ. При $P_b \rightarrow 0$, $\beta \rightarrow 1$ и ЭВК стремится к асимптотическому пределу $\Delta G = \lg(Rd)$ [1].

Другим важным показателем систем с кодированием и M -позиционной модуляцией является информационная эффективность, которая характеризует отношение реальной скорости передачи данных B_0 по каналу связи к его пропускной способности C , определяемой критерием Шеннона:

$$\eta_{\text{инф}} = B_0/C \cong 0,3mR/\lg(1 + 2,3m(-\lg P_b)/(q_i d\beta)). \quad (24)$$

Согласно (24), для повышения $\eta_{\text{инф}}$ необходимо использовать коды с большим кодовым расстоянием d и низкой избыточностью ($R \approx 1$). В системах с M -позиционной модуляцией величина $\eta_{\text{инф}}$ снижается при повышении M , что связано с уменьшением q_i .

На основании (22) и (24) в табл. 2 приведены результаты расчетов ЭВК и $\eta_{\text{инф}}$ для КАМ-4 и расширенных кодов БЧХ в зависимости от значений P_b на выходе декодера.

Таблица 2. Значения энергетического выигрыша от кодирования и $\eta_{\text{инф}}$ для КАМ-4 в зависимости от параметров БЧХ-кодов и P_b
Table 2. Values of energy gain from coding η_{inf} and for КАМ-4 depending on the parameters of BCH codes and P_b

Параметр	Значения параметров кодов и вероятностей ошибок P_b											
	Код (32, 16, 8)			Код (64, 30, 14)			Код (64, 57, 4)			Код (128, 64, 22)		
	10^{-2}	10^{-6}	10^{-12}	10^{-2}	10^{-6}	10^{-12}	10^{-2}	10^{-6}	10^{-12}	10^{-2}	10^{-6}	10^{-12}
ЭВК, дБ	1,535	4,465	5,226	2,2	6,017	7,053	0,45	3,647	4,537	2,773	7,515	8,885
$\eta_{\text{инф}}$, дБ	0,632	0,426	0,324	0,677	0,499	0,377	0,718	0,541	0,438	0,755	0,627	0,481

Из табл. 2 видно, что для кодов (64, 30, 14) и (64, 57, 4) с равными для них n преимущество в ЭВК имеет код с большим d , а преимущество в $\eta_{\text{инф}}$ – код с меньшей избыточностью. Для кодов (32, 16, 8) и (128, 64, 22) при равных R лучшие показатели обеспечивает код с большими значениями n и d . Сравнение ЭВК кодов (32, 16, 8) и (128, 64, 22) с известными значениями ЭВК в случае жесткого декодирования при $P_b = 10^{-6}$ [1] показывает, что выигрыш от применения мягких решений составляет 2,5 и 3,5 дБ соответственно, что является важным фактором при выборе параметров кодов, способов кодирования и декодирования.

На основании (15), (16) несложно получить формулу для определения разницы в уровнях ОСШ между сравниваемыми зависимостями помехоустойчивости систем с M - и F -порядками модуляции и кодированием при равных для них значениях P_b

$$\Delta h_{MF} = h_{kM} - h_{kF} \cong 10 \lg \left[(q_{iF}/q_{iM}) \left(1 - \frac{\lg(C_{iF}/C_{iM})}{-\lg P_b} \right) \right], \quad (25)$$

где h_{kM} , h_{kF} – уровни ОСШ систем с M - и F -порядками модуляции, дБ.

Выражение (25) не зависит от параметров кода и пригодно для определения Δh_{MF} -систем при отсутствии кодирования, а также в случае использования неодинаковых видов модуляции, например, КАМ-М и ФМ-М. Из (25) следует формула для определения ОСШ системы с M -позиционной модуляцией, если известно значение ОСШ с F -позиционной модуляцией при равных для них P_b

$$h_{kM} = h_{kF} + 10 \lg \left[(q_{iF}/q_{iM}) \left(1 - \frac{\lg(C_{iF}/C_{iM})}{-\lg P_b} \right) \right]. \quad (26)$$

Формула (26) является пересчетной и удобной для сокращения проводимых расчетов при определении энергетической эффективности системы с разными многопозиционными видами модуляции и равными для них вероятностями ошибок.

Заключение

1. Представленные исследования основываются на предложенном уравнении взаимосвязи между вероятностью ошибки на выходе декодера и отношением сигнал/шум, которое содержит введенный в рассмотрение обобщенный показатель эффективности декодирования, зависящий от формата модуляции, параметров кодирования и вероятности ошибки.

2. Полученные соотношения позволяют рассчитывать помехоустойчивость, исправляющую способность, энергетический выигрыш от кодирования и информационную эффективность систем с двоичным БЧХ-кодированием, многопозиционной модуляцией и декодированием с мягким решением. Соотношения представлены в компактном и удобном для проведения расчетов виде, не требуют знания весовых коэффициентов спектра кода и использования процедур компьютерного моделирования.

3. На основании выполненных расчетов по предложенным аналитическим моделям показано хорошее соответствие между полученными характеристиками и вычисленными по методике, требующей знание весового коэффициента спектра кода. Представлены результаты возможного выигрыша в энергетической эффективности устройств с разными параметрами кодов при декодировании по алгоритму SOVA с мягким решением по сравнению с жестким.

4. Приведены простые пересчетные формулы для определения требуемых значений отношения сигнал/шум системы с M -позиционной модуляцией по известным значениям отношения сигнал/шум системы с F -позиционной модуляцией при заданной достоверности приема.

Список литературы

1. Золотарев, В. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. М.: Горячая Линия – Телеком, 2004.
2. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. М.: Техносфера, 2005.
3. Липкович, Э. Б. Системы и устройства спутникового мультимедийного вещания и интерактивной связи / Э. Б. Липкович. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлектр., 2020.
4. Липкович, Э. Б. Аналитическая модель расчета помехоустойчивости систем с многопозиционными видами модуляции и кодированием / Э. Б. Липкович, А. А. Серченя // Электросвязь. 2020. № 10. С. 63–67.
5. Липкович, Э. Б. Методика расчета эффективности систем связи с многопозиционными видами модуляции и многокаскадным составным кодированием / Э. Б. Липкович, В. В. Рабцевич // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 45–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-45-52>.
6. Кларк, Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. Кларк, Дж. Кейн; пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987.

Поступила 02.05.2025

Принята в печать 01.07.2025

References

1. Zolotarev V. V., Ovechkin G. V. (2004) *Noisy-Correcting Coding. Methods and Algorithms*. Moscow, HotlineTelecom Publ. (in Russian).
2. Morelos-Zaragoza R. (2005) *The Art of Error Correcting Coding. Methods, Algorithms, Application*. Moscow, Technosphere Publ. (in Russian).

3. Lipkovich E. B. (2020) *Satellite Multimedia Broadcasting and Interactive Communication Systems and Devices*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Publ. (in Russian).
4. Lipkovich E. B., Serchenya A. A. (2020) Analytic Model for Calculating the Noisy Immunity of Communication Systems with Multi-Position Modulation Types and Convolutional Coding. *Electrosvyaz*. (10), 62–66 (in Russian).
5. Lipkovich E. B., Rabtsevich V. V. (2023) A Method for Calculating of the Efficiency of Communication Systems with Multiple Modulation Types and Multi-Stage Composite Coding. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 45–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-45-52> (in Russian).
6. Clark G., Cain J. (1987) *Error-Correction Coding for Digital Communications*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. (in Russian).

Received: 2 May 2025

Accepted: 1 July 2025

Вклад авторов

Липкович Э. Б. разработал методику расчета характеристик систем с БЧХ-кодированием.
Беленкевич Н. И. подготовила программное обеспечение для исследований.
Зорько М. И. выполнил сравнительную оценку характеристик систем.

Authors' contribution

Lipkovich E. B. developed a method for calculating the characteristics of systems with BCH coding.
Belenkevich N. I. prepared the software for research.
Zorka M. I. conducted a comparative evaluation of system characteristics.

Сведения об авторах

Липкович Э. Б., доц., доц. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Беленкевич Н. И., канд. техн. наук, доц. каф. инфокоммуникационных технологий, БГУИР

Зорько М. И., ассист. каф. инфокоммуникационных технологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: + 375 17 293-88-19
Email: belenkevich@bsuir.by
Беленкевич Наталья Ивановна

Information about the authors

Lipkovich E. B., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Belenkevich N. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor at the Department of Infocommunication Technologies, BSUIR

Zorka M. I., Assistant at the Department of Infocommunication Technologies, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-19
Email: belenkevich@bsuir.by
Belenkevich Natalia Ivanovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-53-57>

УДК 53.043

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ КВАРЦЕВОЙ ДВОЯКОВЫПУКЛОЙ ЛИНЗЫ ПРИ ВАКУУМНОМ КРЕПЛЕНИИ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

И. В. ХОДЯКОВ, И. О. МАКАРЦОВ

ОАО «Планар» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Современные проекционно-оптические системы, такие как DUV-литография и высокоапертурные объективы, требуют высокой точности обработки поверхностей, что делает учет механических деформаций оптических элементов особенно важным. В статье представлены результаты компьютерного моделирования деформации кварцевой двояковыпуклой линзы диаметром 195 мм под воздействием вакуума. Исследование выполнено в программных комплексах CAE (Computer-aided engineering) с различными алгоритмами расчетов. Использовалась модель линзы, спроектированная в системе CAD (Computer-aided design). Материал линзы – кварцевое стекло с модулем Юнга 72 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,17. Установлено, что рабочий перепад давления 15 кПа вызывает неравномерную деформацию поверхности линзы с максимальными значениями от 22,59 до 23,24 нм в зависимости от алгоритма расчета. Расхождение между результатами составило 2,8 %. Установлена линейная зависимость деформации от перепада давления: при изменении перепада с 0 до 18 кПа деформация возрастает от 0,75 до 27,74 нм. Наибольшее искажение поверхности наблюдается в центральной зоне линзы, что критично для интерферометрических измерений, требующих точности в нанометровом диапазоне. Результаты подчеркивают необходимость корректировки параметров вакуумного крепления для минимизации деформаций и повышения качества обработки оптических поверхностей.

Ключевые слова: метод конечных элементов, механические напряжения, интерферометрический анализ, программный комплекс CAE, система CAD, интерферометрия, вакуумное крепление, нанометровая деформация, гибридная адаптация сетки, кривизна поверхности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ходяков, И. В. Компьютерное моделирование деформации кварцевой двояковыпуклой линзы при вакуумном креплении в интерферометре / И. В. Ходяков, И. О. Макарец // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 53–57. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-53-57>.

COMPUTER-BASED SIMULATION OF DEFORMATION OF A QUARTZ BICONVEX LENS DURING VACUUM MOUNTING IN AN INTERFEROMETER

ILYA V. KHADZIAKOU, IVAN O. MAKARTSOV

Open Joint-Stock Company “Planar” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Modern projection optical systems, such as DUV lithography and high-numerical-aperture objectives, require extremely high surface machining accuracy, making the consideration of mechanical deformations of optical elements particularly critical. This paper presents the results of a computer simulation of the deformation of a 195 mm diameter fused silica biconvex lens under vacuum. The study was performed in CAE (Computer-aided engineering) software suites employing different calculation algorithms. A lens model designed in a CAD (Computer-aided design) system was used. The lens material is fused silica with a Young’s modulus of 72 GPa and a Poisson’s ratio of 0.17. It was established that an operational pressure differential of 15 kPa causes non-uniform deformation of the lens surface, with maximum values ranging from 22.59 to 23.24 nm, depending on the calculation algorithm. The discrepancy between the results was 2.8 %. A linear dependence of deformation on the pressure differential was established: as the pressure differential changes from 0 to 18 kPa, the deformation increases from 0.75 to 27.74 nm. The greatest surface distortion is observed

in the central zone of the lens, which is critical for interferometric measurements requiring nanometer-level accuracy. The results underscore the necessity of adjusting vacuum mounting parameters to minimize deformations and improve the quality of optical surface machining.

Keywords: finite element method, mechanical stresses, interferometric analysis, CAE software, CAD system, interferometry, vacuum mounting, nanometer-scale deformation, hybrid mesh adaptation, surface curvature.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Khadziakou I. V., Makartsou I. O. (2025) Computer-Based Simulation of Deformation of a Quartz Biconvex Lens During Vacuum Mounting in an Interferometer. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 53–57. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-53-57> (in Russian).

Введение

Сверхточные и сверхгладкие поверхности критически важны для некоторых высокопроизводительных оптических систем. Например, полировка деталей методом ионно-лучевого травления [1, 2] – стандартный метод финального высокоточного формирования оптических поверхностей высокого класса [3].

Для контроля поверхности полученных деталей используются методы интерферометрии [4]. Интерферометры широко применяются в науке и промышленности для измерения прецизионных смещений, изменений показателя преломления и неровностей поверхности. В большинстве интерферометров свет от одного источника разделяется на два луча, проходящих по разным оптическим путям, которые затем снова объединяются для создания интерференционной картины. Результирующие интерференционные полосы дают информацию о разнице в оптических длинах пути. Высокая точность интерферометров позволяет измерять длины и формы оптических компонент до нанометра.

Крепление оптических деталей в интерферометре может происходить путем зажатия линзы с трех сторон. Альтернативный вариант – размещение детали на специальном приспособлении с вакуумной фиксацией. Вакуумное крепление удерживает линзу за счет разности ΔP атмосферного давления и разрежения, созданного под линзой, и является наиболее универсальным видом крепления, используемым в интерферометрах. С его помощью можно закрепить большое количество разнообразных оптических деталей без необходимости разработки специализированных креплений. В большинстве интерферометров максимальный допустимый диапазон ΔP лежит пределах от 0 до 40 кПа, а рекомендуемый рабочий диапазон – 10–18 кПа.

Однако в вакуумных креплениях есть существенный недостаток – это деформация оптических деталей под действием вакуума, что негативно сказывается на получаемой интерферограмме и последующей обработке детали. Предполагается, что зависимость деформации от ΔP является линейной, что требует проверки методами САЕ (Computer-aided engineering). Современные САЕ-программы обеспечивают детальную визуализацию распределения напряжений и деформаций по всей поверхности линзы. Кроме того, моделирование предоставляет возможность варьировать параметры в широком диапазоне, что ускоряет поиск оптимальных решений для минимизации деформаций [5]. В статье рассматривается влияние ΔP на механическую деформацию кварцевой линзы.

Методика моделирования

Для анализа механического воздействия вакуума на деформацию оптической детали была взята двояковыпуклая линза диаметром 195 мм с радиусами кривизны 295,1 и 1564,6 мм. Линза фиксировалась при помощи крепления диаметром 80 мм, представляющего собой полый цилиндр, подключенный к вакуумной системе для удержания детали на торце за счет силы прижатия, возникающей из-за разности между атмосферным давлением и низким давлением в полости цилиндра. Данный тип крепления широко используется для фиксации линз диаметром более 150 мм в измерительных приборах. Геометрическая модель линзы (рис. 1) построена в системе САД (Computer-aided design).

Для моделирования линзы был выбран материал Fused Quartz со следующими параметрами:

- модуль Юнга – (~ 72) ГПа;
- коэффициент Пуассона – 0,17;
- плотность – 2200 кг/м³.

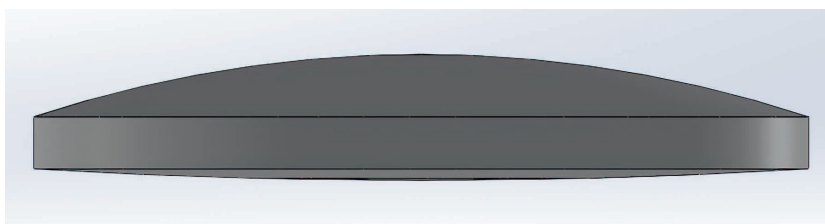


Рис. 1. Модель линзы
Fig. 1. Lens model

Также учитывалось гравитационное ускорение $9,81 \text{ м/с}^2$ как внешняя сила. Исходя из габаритов линзы, выбран перепад давления $\Delta P = 15 \text{ кПа}$. Для моделирования деформации модель линзы была разбита на полигональную сетку, состоящую из треугольников с размерами в диапазоне от $0,00037$ до $0,00370 \text{ мм}$.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты моделирования деформации кварцевой линзы при использовании вакуумного крепления. Из рисунков видно, что деформация линзы распределена неравномерно, с наибольшими изменениями в центральной части линзы, где наблюдается ярко выраженное кольцо повышенной деформации, точно повторяющее геометрию края вакуумного крепления. В этом месте находится область разности давления, создаваемая вакуумным креплением. Полученная модель подтверждает, что использование вакуумного крепления вызывает значительные механические деформации, особенно в области, не поддерживаемой опорой.

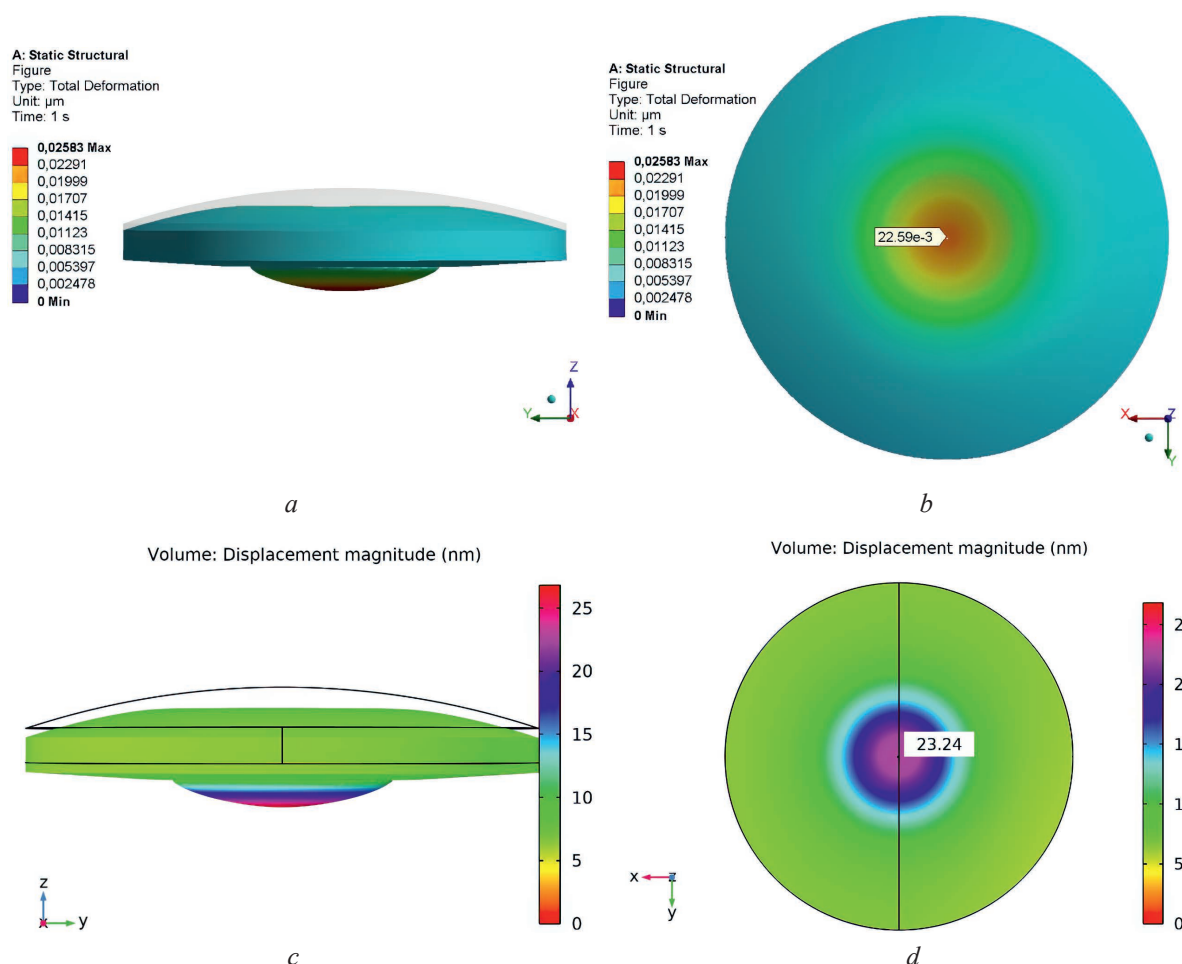


Рис. 2. Моделирование деформации линзы в различных программных комплексах CAE:
 a, c – вид сбоку; b, d – вид сверху

Fig. 2. Simulation of lens distortion in diverse CAE programs: a, c – side view; b, d – top view

Из рис. 2, *b* видно, что значение максимальной деформации линзы составило 22,59 нм, для рис. 2, *d* – 23,24 нм. Относительное расхождение между результатами – 2,8 %. Несмотря на расхождения, результаты демонстрируют сопоставимый порядок величин, что подтверждает корректность моделей. Незначительная разница полученных значений может быть обусловлена различными алгоритмами дискретизации в системах автоматизации проектных работ: для рис. 2, *a*, *b* применялся модифицированный метод Ньютона – Рафсона [6, 7], для рис. 2, *c*, *d* – гибридный подход с адаптацией сетки.

Зависимость деформации поверхности линзы от перепада давления ΔP изображена на рис. 3.

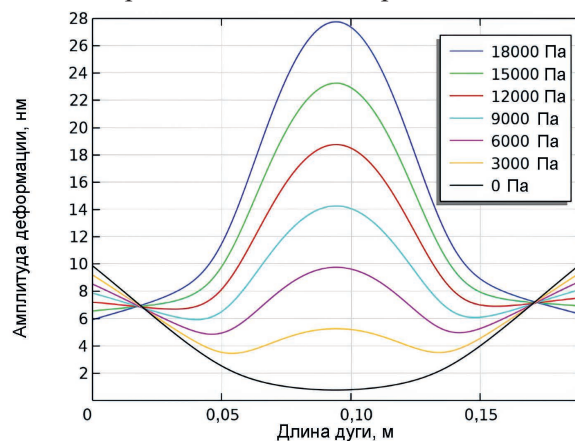


Рис. 3. Зависимость деформации поверхности линзы от перепада давления

Fig. 3. The impact of vacuum on the curvature of the lens

По оси абсцисс представлена радиальная координата, характеризующая положение точек на поверхности линзы в меридиональном сечении от оптического центра к периферии. По оси ординат отображена амплитуда деформации, обусловленная механическими напряжениями. Из графиков видно, что с увеличением ΔP деформация линзы возрастает. Такая зависимость критична, поскольку деформация вызывает расхождение между данными о поверхности, измеренными интерферометром, и ее реальной формой. Поэтому для высокоточных измерительных оптических систем деформация линзы под вакуумом является значительным источником вносимой погрешности.

По полученным данным можно сделать вывод о прямой зависимости увеличения деформации линзы от роста ΔP . Увеличение ΔP приводит к росту механических деформаций, максимальные значения которых наблюдаются в центральной зоне линзы с наибольшей кривизной. Деформация линзы при $\Delta P = 0$ обусловлена наличием гравитационного ускорения как внешней силы в модели. Результаты моделирования можно использовать для последующей коррекции ΔP , что позволяет сократить необходимость ресурсоемких экспериментальных испытаний при выборе оптимального значения ΔP для достижения достоверной интерференционной картины.

Заключение

1. Результаты исследования демонстрируют значительное влияние перепада давления, создаваемого вакуумным креплением, на механическую деформацию кварцевой линзы. Полученная деформация при заданных параметрах составила 23,24 нм, что может быть критичным для оптических систем, требующих высокой точности обработки поверхностей в нанометровом диапазоне. Это подчеркивает необходимость учета механических деформаций при проектировании и полировке оптических деталей, например, в проектах типа DUV-литографии, где требования к RMS могут быть менее 1,00 нм. В таком контексте деформация 23,24 нм становится неприемлемой.

2. Представленное исследование открывает возможность для дальнейшего изучения методов компенсации деформаций линзы, вызванных внешними силами, что может быть полезно для повышения точности интерферометрических измерений и улучшения качества обработки оптических поверхностей.

Список литературы

1. Morphology Evolution of Fused Silica Surface During Ion Beam Figuring of High-Slope Optical Components / W. Liao [et al.] // Applied Optics. 2013. Vol. 52, No 16. P. 3719–3720. DOI: 10.1364/AO.52.003719.

2. Correction of High Spatial Frequency Errors on Optical Surfaces by Means of Ion Beam Figuring / M. Ghigo [et al.] // *Optical Manufacturing and Testing VII*. 2007. Vol. 6671. DOI: 10.1117/12.734273.
3. Ion Beam Figuring System for Ultra-Precise Optics / Z. Yuan [et al.] // *Key Eng. Mater.* 2012. Vol. 516. P. 19–24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.516.19.
4. Интерферометрия, как высокоточный инструмент для контроля оптических элементов прецизионной оптики / Е. Е. Майоров [и др.] // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023. Вып. 11. С. 192–196. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-192-196.
5. Ядровская, М. В. К вопросу о компьютерном моделировании / М. В. Ядровская // *Advanced Engineering Research*. 2020. Т. 20, № 3. С. 332–345. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345.
6. Polyak, B. T. Newton's Method and Its Use in Optimization / B. T. Polyak // *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 181. P. 1086–1096. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.06.0.
7. Meza, J. C. Newton's Method / J. C. Meza // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2010. Vol. 3. P. 75–78. DOI: 10.1002/wics.129.

Поступила 24.04.2025

Принята в печать 16.09.2025

References

1. Liao W., Dai Y., Xie X., Zhou L. (2013) Morphology Evolution of Fused Silica Surface During Ion Beam Figuring of High-Slope Optical Components. *Appl Opt.* 52 (16), 3719–3720. DOI: 10.1364/AO.52.003719.
2. Ghigo M., Canestrari R., Spiga D., Novi A. (2007) Correction of High Spatial Frequency Errors on Optical Surfaces by Means of Ion Beam Figuring. *Optical Manufacturing and Testing VII*. 6671. DOI: 10.1117/12.734273.
3. Yuan Z., Dai Y. F., Xie X. H., Zhou L. (2012) Ion Beam Figuring System for Ultra-Precise Optics. *Key Eng. Mater.* 516, 19–24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.516.19.
4. Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodyansky Y. M., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S. (2023) Interferometry as a High-Precision Tool for Control of Optical Elements in Precision Optics. *Bull. Tul. State Univ. Tech. Sci.* 11, 192–196. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-192-196 (in Russian).
5. Yadrovskaya M. V. (2020) On the Issue of Computer Modeling. *Adv. Eng. Res.* 20 (3), 332–345. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345 (in Russian).
6. Polyak B. T. (2007) Newton's Method and Its Use in Optimization. *European Journal of Operational Research*. 181, 1086–1096. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.06.0.
7. Meza J. C. (2010) Newton's Method. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 3, 75–78. DOI: 10.1002/wics.129.

Received: 24 April 2025

Accepted: 16 September 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ходяков И. В., инж.-техн. ОАО «Планар», магистрант каф. электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Макарцов И. О., инж. ОАО «Планар», магистрант каф. электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220033, Республика Беларусь,
Минск, просп. Партизанский, 2, корп. 2
ОАО «Планар»
Тел.: +375 29 331-72-46
E-mail: hodyakov12@gmail.com
Ходяков Илья Витальевич

Information about the authors

Khadziakou I. V., Process Engineer of OJSC “Planar”, Master's Student at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Makartsov I. O., Engineer of OJSC “Planar”, Master's Student at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220033, Republic of Belarus,
Minsk, Partizansky Ave., 2, Bld. 2
OJSC “Planar”
Tel.: +375 29 331-72-46
E-mail: hodyakov12@gmail.com
Khadziakou Ilya Vitalievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-58-65>

УДК 621.2.095.1

РАСПОЗНАВАНИЕ ТИПОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО ТРАЕКТОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Е. Ф. АПОЧКИНА, Т. В. ПРОКОФЬЕВА, В. А. АПОРОВИЧ

ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье представлены результаты решения задачи распознавания типов баллистических ракет с помощью нейронных сетей по траекторной информации. Для распознавания использовалась траекторная информация от радиолокационных станций, сопровождающих данные баллистические объекты. Рассмотрено распознавание с помощью нейронных сетей по параметрам «высота – энергетическая высота». Моделирование показало, что при примерно одинаковом времени решения задачи вероятность правильного распознавания для нейронных сетей прямого распространения (Feed forward neural network, FFNN) существенно больше, чем для алгоритма с разбиением плоскости на ячейки, использовавшегося для сравнения.

Ключевые слова: баллистические ракеты, распознавание, радиолокационное сопровождение, траекторная информация, энергетическая высота, нейронные сети.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Апочкина, Е. Ф. Распознавание типов баллистических ракет с помощью нейронных сетей по траекторной информации / Е. Ф. Апочкина, Т. В. Прокофьева, В. А. Апович // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 58–65. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-58-65>.

RECOGNITION OF BALLISTIC MISSILE TYPES USING NEURAL NETWORKS BASED ON TRAJECTORY INFORMATION

ALENA F. APOCHKINA, TATIANA V. PROKOFIEVA, ULADZIMIR A. APAROVICH

OJSC “AGAT – Control Systems” – Managing Company of “Geoinformation Control Systems” Holding (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This article presents the results of solving the problem of recognizing ballistic missile types using neural networks based on trajectory information. Trajectory information from radar stations tracking these ballistic objects was used for recognition. Recognition using neural networks based on the “altitude – energy altitude” parameters is considered. Simulations showed that, with approximately equal solution times, the probability of correct recognition for feedforward neural networks (FFNN) is significantly higher than for the plane-cell-based algorithm used for comparison.

Keywords: ballistic missiles, recognition, radar tracking, trajectory information, energy altitude, neural networks.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Apochkina A. F., Prokofieva T. V., Aparovich U. A. (2025) Recognition of Ballistic Missile Types Using Neural Networks Based on Trajectory Information. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 58–65. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-58-65> (in Russian).

Введение

Задача распознавания типа баллистической ракеты (БР) на основе траекторной информации является частью общей задачи распознавания БР. В статье предлагается алгоритм, использующий нейронные сети (НС) для решения данной задачи на основе траекторной информации о подобном объекте.

Предполагается наличие нескольких заранее известных типов БР; каждому типу присущ свой набор тактико-технических характеристик, определяющих максимальную дальность полета. Будем считать, что алфавит типов в рассматриваемой задаче распознавания представляет собой конечный набор разновидностей БР, имеющих максимальные дальности полета ($D_{\max 1}, D_{\max 2}, \dots, D_{\max N}$); две БР считаются принадлежащими к одному типу, если их максимальные дальности полета совпадают.

Траектории полета БР на максимальную дальность называются оптимальными; величины углов бросания, при которых обеспечивается максимальная дальность полета, называют оптимальными углами бросания. Траектории полета на меньшие дальности с углом бросания меньше оптимального называются настильными, с углом бросания больше оптимального – навесными [1]. В общем случае БР может двигаться по траектории, не являющейся оптимальной, и поэтому не достигать своей конструктивно заложенной максимальной дальности полета.

Предположим, что БР обнаруживаются и сопровождаются с помощью радиолокационных станций (РЛС). РЛС составляют измерительный радиолокационный комплекс, который является составной частью автоматизированной системы управления и наблюдения (АСУ) за воздушной и космической обстановкой [2]. Еще одна важная составная часть АСУ – комплекс вычислительных средств (КВС) обработки радиолокационной информации, который в числе прочих выполняет задачу распознавания БР. РЛС измеряют координаты БР (азимут, дальность, высоту) в точках траектории; по измеренным координатам выполняется калмановская фильтрация с пересчетом в прямоугольную систему координат и оценкой составляющих скорости в этой системе.

В настоящее время для распознавания широко используются критерии принадлежности пары «высота – энергетическая высота (ЭВ) баллистического объекта (БО)» к некоторым областям на плоскости «высота – ЭВ» [3].

Энергетическая высота He – это удельная механическая энергия объекта, т. е. полная механическая энергия E , отнесенная к единице веса объекта P : $He = E/P$. Физический смысл ЭВ состоит в том, что при равенстве нулю возмущающих сил любое тело в гравитационном поле может за счет полного превращения кинетической энергии в потенциальную подняться на высоту He [3, с. 186]. Другими словами, ЭВ – это некоторая фиктивная высота условного объекта, где его потенциальная энергия равна сумме потенциальной и кинетической энергии реального объекта.

Данные, получаемые от РЛС, позволяют осуществлять расчет ЭВ в соответствии с [4] в каждой точке траектории по формуле

$$He = \frac{GM}{\frac{GM}{r} - \frac{v^2}{2}} - Rz, \quad (1)$$

где r – модуль вектора координат объекта в прямоугольной геоцентрической системе координат (ГСК), т. е. расстояние от центра Земли до объекта, м; v – модуль скорости объекта, м/с; G – гравитационная постоянная, $G = 6,67384 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$; M – масса Земли, $M = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ кг}$; Rz – средний радиус Земли, $Rz = 6\,371\,000 \text{ м}$.

Преимуществами использования ЭВ в задаче распознавания являются простота расчетов, независимость от массы объекта и неизменяемость практически на всем пассивном участке полета БР.

Алгоритм распознавания с помощью нейронной сети

На вход алгоритма распознавания подается вектор, содержащий информацию о высоте H и ЭВ He в нескольких отметках (далее рассматривается вектор с информацией о пяти отметках). Для решения задачи распознавания был выбран многослойный перцептронный классификатор (рис. 1), который представляет собой НС, состоящую из нескольких слоев, а именно – из входного, двух скрытых и выходного слоев, где каждый слой включает множество ней-

ронов: для входного слоя количество составляет 10 нейронов, для каждого скрытого – по 200, а для выходного – один нейрон. Преимущества многослойного перцептронного классификатора заключаются в выявлении нелинейных зависимостей между входными и выходными данными, это делает его особенно полезным при решении поставленной задачи [5].

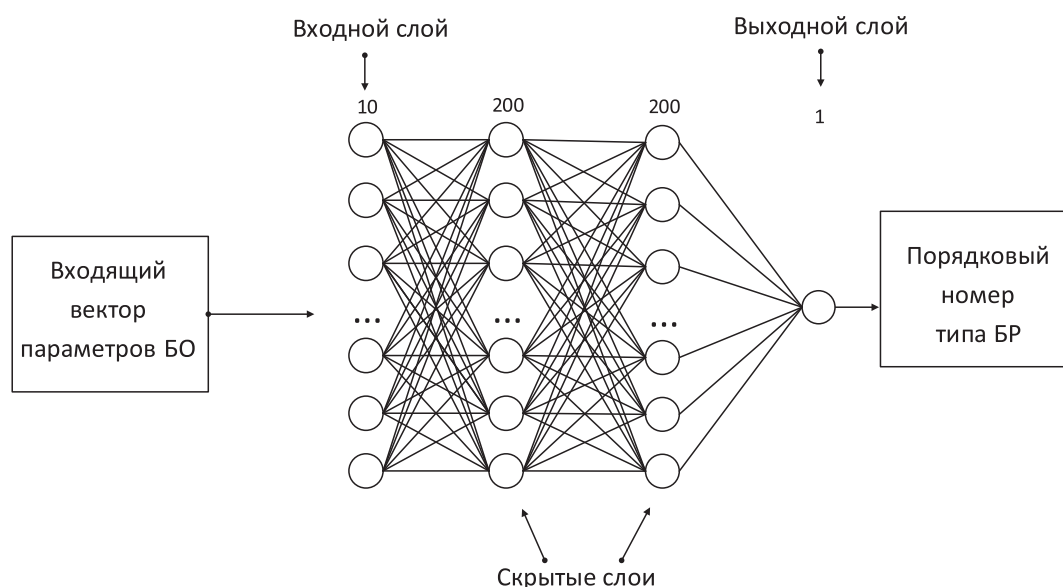


Рис. 1. Многослойный перцептронный классификатор
Fig. 1. Multilayer perceptron classifier

На выходе алгоритма получаем оценку типа БР в виде его порядкового номера в имеющемся наборе типов. Перед тем как приступить к работе с НС, необходимо провести ее обучение. Процесс обучения осуществляется с учителем: НС сравнивает свои результаты с известными заранее правильными ответами и соответственно корректирует собственные внутренние параметры. В результате работы алгоритма на выходе получается тип баллистической ракеты.

В качестве среды разработки был выбран язык программирования Python, что обуславливалось отсутствием ограничений на размеры входных данных. Для реализации НС использовалась модель MLPClassifier (многослойный перцептронный классификатор).

Для обучения НС применялись два набора данных в 20 тыс. и 100 тыс. векторов с разным процентным соотношением для обучения и контроля (80 % – обучение и 20 % – тест, 91 % – обучение и 9 % – тест). Набор данных генерировался с помощью описанной ниже модели.

В ходе исследований алгоритма проводились подборка и настройка параметров для достижения его максимальной эффективности. Для оптимизации гиперпараметров модели использовался метод greedy (жадный подход), который позволил последовательно настраивать параметры НС. В качестве функций активации тестировались ReLU (Rectified Linear Unit), tanh (гиперболического тангенса) и logistic (сигмоидная). На основании проведенного сравнительного анализа показателя точности решения задачи наилучшим вариантом оказалась функция ReLU.

Описание модели и результаты моделирования

Исследование и обучение алгоритма распознавания осуществлялись методом компьютерного моделирования. Принимали, что известны три условных типа БР: М1, М2 и М3. Имитировались:

- траектории БР [6, 7];
- тип и положение РЛС;
- ошибки измерения координат БР на РЛС.

Параметры активных участков (АУ) моделируемых БР приведены в табл. 1.

Ракеты каждого типа запускались по навесным и настильным траекториям на дальность от $D_{\max}/2$ до $D_{\max}$ с шагом по дальности $\Delta D = D_{\max}/80$. Принимали, что обнаружение БР происходит на пассивном участке. Случайным образом на пассивных участках траекторий выбирались радиолокационные отметки начала распознавания; распознавание выполнялось по пяти

следующим друг за другом отметкам траектории от одной РЛС. В состав каждой отметки входила информация о координатах и составляющих скорости БР, по которым рассчитывались значения высоты и ЭВ для передачи на вход задач распознавания.

Таблица 1. Характеристики активных участков моделируемых баллистических ракет
Table 1. Characteristics of active areas of simulated ballistic missiles

Параметр	$D_{\max}$, км, для типов баллистических ракет		
	M1	M2	M3
	2500	2800	3000
Скорость БР на конце АУ (КАУ)			
Для оптимальной траектории, м/с	4180	4600	4740
Для настильной траектории, м/с	4130	4550	4700
Для навесной траектории, м/с	4050	4550	4630
Время			
КАУ, с	136	105	116
Дальность от точки старта и высота в точке КАУ для траектории			
оптимальной			
Дальность, м	137 700	97 700	100 000
Высота, м	181 500	96 000	112 600
настильной			
Дальность, м	180 000	150 000	160 000
Высота, м	180 000	39 000	43 000
навесной			
Дальность, м	57 000	40 000	52 500
Высота, м	190 000	130 000	155 000

Местоположение РЛС разыгрывалось случайным образом относительно пространственного положения отметки, с которой начиналось распознавание (рис. 2). Для этого принимались равномерно распределенные:

- наклонная дальность R от 0 до $R_{\max}$ ($R_{\max}$ – максимальная наклонная дальность РЛС);
- азимут β от 0 до 2π .

Положение РЛС показано на рис. 2.

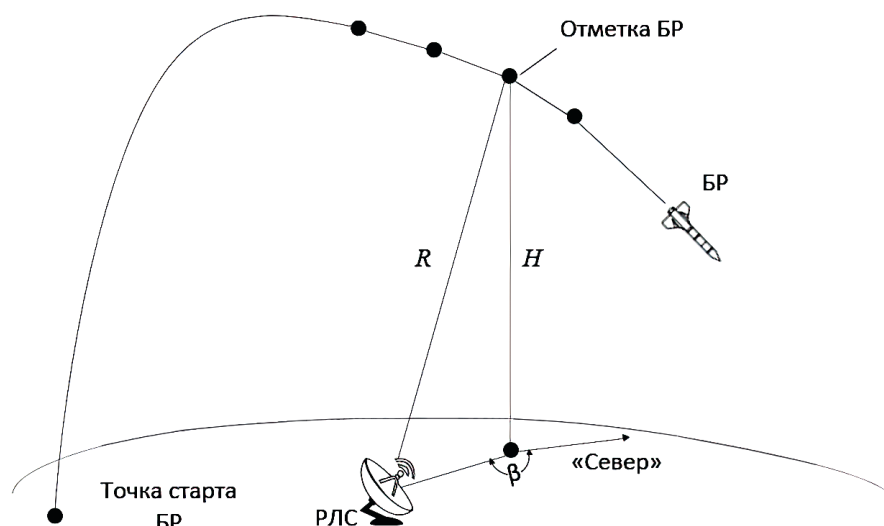


Рис. 2. Положение радиолокационной станции
Fig. 2. Position of the radar

Поскольку КВС обработки радиолокационной информации в составе АСУ в общем случае может принимать данные от РЛС различных типов, для обучения НС также моделировались данные от разнотипных РЛС. В ходе сопровождения БР алгоритмы КВС могут несколько раз вызывать задачу распознавания типа на разных этапах сопровождения, поэтому для обучения НС использовалась случайным образом разыгранная длительность предшествующего наблюдаемого участка.

Моделирование РЛС осуществлялось для РЛС четырех типов (табл. 2). Тип РЛС разыгрывался случайным образом с учетом следующего ограничения: максимальная наклонная дальность РЛС $R_{\max}$ должна превышать высоту отметки H . Период T обзора РЛС принимался равным 1 с.

Таблица 2. Параметры радиолокационной станции
Table 2. Characteristics of radars

Тип РЛС	Среднеквадратическая ошибка измерения			$R_{\max}$, км
	дальности, м	азимута, рад.	угла места, рад.	
1	100	0,0050	0,008	500
2	70	0,0030	0,006	300
3	50	0,0020	0,003	1000
4	20	0,0006	0,001	600

Ошибки координат и составляющих скорости на РЛС моделировались следующим образом:

- разыгрывался номер сглаженной отметки N как случайное целое число, равномерно распределенное на интервале 5–150;
- рассчитывался коэффициент степени сглаживания координат по формуле [2, с. 220, 356]

$$K_c = \sqrt{\frac{2 \cdot (2N + 1)}{N(N + 1)}}; \quad (2)$$

- рассчитывался коэффициент степени сглаживания составляющих скорости по формуле [2] (поскольку для баллистической траектории ускорение детерминировано гравитационными силами, в ходе фильтрации оцениваются только координаты и составляющие скорости, поэтому ошибки сглаженных параметров соответствуют ошибкам при линейном сглаживании [2, с. 236])

$$K_v = \frac{1}{T} \cdot \sqrt{\frac{12}{N(N^2 - 1)}}; \quad (3)$$

- ковариационная матрица ошибок измерения дальности, азимута, угла места пересчитывалась из сферической системы координат в прямоугольную ГСК;

- полученная ковариационная матрица ошибок измерения в ГСК умножалась на K_c^2 для получения ковариационной матрицы вектора сглаженных координат и на K_v^2 для получения ковариационной матрицы вектора сглаженной скорости;

- по полученным ковариационным матрицам ошибок разыгрывались случайные значения координат и составляющих скорости, по которым затем рассчитывались значения высоты и ЭВ для БР. Высота рассчитывалась путем пересчета геоцентрических координат в геодезические в соответствии с [8]; ЭВ вычислялась по (1).

Пример результата моделирования высоты и ЭВ на пассивном участке, как исходных данных для распознавания и обучения, показан на рис. 3. Из рисунка видно, что множества точек для разных траекторий определенных типов БР (М1, М2, М3) сложным образом перекрываются, что существенно затрудняет распознавание.

Для сравнения использовался алгоритм с разбиением плоскости на ячейки (АРП): плоскость «высота БР – энергетическая высота» (H, He) разбивается на квадраты (ячейки) размерами, например, 10×10 км. Каждая ячейка ассоциируется с определенным типом баллистической ракеты: из всех ракет, параметры которых соответствуют данной области, выбирается ракета с наибольшим значением максимальной дальности. Использовалось накопление информации по пяти отметкам: выполнялось распознавание для каждой из пяти следующих друг за другом отметок траектории, а итоговое значение типа БР определялось по критерию «3 вхождения типа из 5».

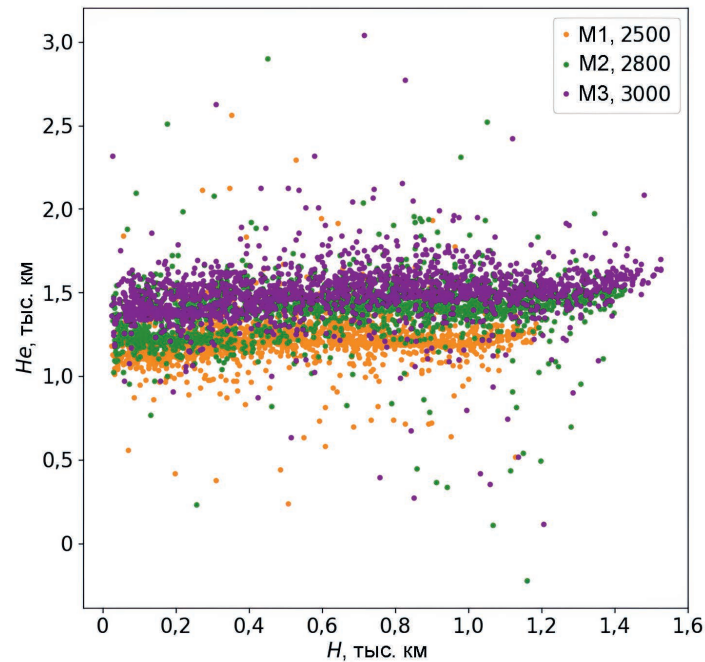


Рис. 3. Результат моделирования высоты и энергетической высоты
Fig. 3. The result of modeling the height and energy height

В распознавании с НС использовалась та же информация: на вход НС подавался вектор, содержащий информацию о пяти следующих друг за другом отметках. Параметры по характерным результатам моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты моделирования
Table 3. Simulation results

Размер базы данных, тыс.	Процент проверочной выборки (количество случаев, тыс.)	Вероятность правильного распознавания	
		НС	АРП
20	9 (1,8)	0,747	0,380
	20 (4)	0,741	0,379
100	9 (9)	0,797	0,385
	20 (20)	0,802	0,385

В АСУ, выполняющих сопровождение большого количества объектов, важно обеспечить достаточное для бесперебойной работы системы быстродействие решения всех подзадач. Поэтому для оценки возможности включения какого-либо алгоритма в состав программного обеспечения АСУ необходимо знать среднее и максимальное время его работы. Время, затраченное НС и АРП на распознавание, приведено в табл. 4. Моделирование выполнялось в среде Windows на ПЭВМ с тактовой частотой процессора 3,9 ГГц и объемом ОЗУ 24 ГБ.

Таблица 4. Время распознавания
Table 4. Recognition time

Количество случаев, тыс.	Время, затраченное на распознавание, мс	
	НС	АРП
9	47	62
20	104	32

Приведенные результаты показывают, что вероятность правильного распознавания для НС существенно больше, чем для АРП (табл. 3); при этом время реализации алгоритма распознавания для НС и АРП соизмеримо (табл. 4). Предложенный алгоритм, как более эффективный с точки зрения правильного распознавания, может быть рекомендован для использования в реальных системах.

Заключение

1. Сравнение результатов работы нейронной сети и алгоритма с разбиением плоскости на ячейки с помощью моделирования показало, что распознавание типа баллистической ракеты с использованием нейронных сетей обеспечивает существенно более высокую эффективность. Это может объясняться тем, что многослойный перцептрон способен выявлять сложные зависимости в данных благодаря своей нелинейной природе.

2. Полученные результаты оставляют пространство для дальнейшего улучшения. В качестве перспективных направлений можно выделить оптимизацию архитектуры сети (например, подбор числа слоев и нейронов) и более тщательную предобработку данных. Дополнительно стоит рассмотреть применение других моделей машинного обучения для сравнения качества и устойчивости решений. Также можно использовать дополнительные метрики оценки, чтобы получить более достоверную картину производительности модели.

Список литературы

1. Охоцимский, Д. Е. Основы механики космических аппаратов / Д. Е. Охоцимский, Ю. Г. Сихарулидзе. М.: Наука, 1990.
2. Кузьмин, С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. М.: Сов. радио, 1974.
3. Медников, В. Н. Динамика полета и пилотирование самолетов / В. Н. Медников. Монино: Воен.-возд. акад. им. Ю. А. Гагарина, 1976. <https://libcats.org/book/1238073>.
4. Трофимова, Т. И. Курс физики. Учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова; изд. 9-е, перераб. и доп. М.: Изд. центр «Академия», 2004.
5. Бишоп, К. М. Распознавание образов и машинное обучение / К. М. Бишоп. М.: Изд. дом «Вильямс», 2020.
6. Апорович, В. А. Полиномиальная модель активного участка траектории ракеты-носителя / В. А. Апорович, В. И. Ольшанский, Н. С. Буглак // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 1-й Междунар. радиоэлектрон. форум МРФ–2002. Ч. 1. Харьков, Украина, 2002. С. 31–33.
7. Космические траекторные измерения / Под ред. П. А. Агаджанова [и др.]. М.: Сов. радио, 1969. <https://reallib.org/reader?file=1220987>.
8. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек: ГОСТ 32453–2017. Введ. 01.07.2018.

Поступила 14.07.2025

Принята в печать 29.09.2025

References

1. Ohocymsky D. E., Sikharulidze Y. G. (1990) *Fundamentals of Spaceflight Mechanics*. Moscow, Publishing House "Science" (in Russian).
2. Kuzmin S. Z. (1974) *The Basics of the Theory of Digital Processing of Radar Information*. Moscow, Publishing House "Soviet Radio" (in Russian).
3. Mednikov V. N. (1976) *Flight Dynamics and Aircraft Piloting*. Monino, Yuri Gagarin Air Force Academy. <https://libcats.org/book/1238073> (in Russian).
4. Trofimova T. I. (2004) *Physics Course. Textbook for High Schools*. Moscow, Publishing Center "Academy" (in Russian).
5. Bishop C. M. (2020) *Pattern Recognition and Machine Learning*. Moscow, Publishing House "Williams" (in Russian).
6. Aporovich V. A., Olshansky V. I., Buglac N. S (2002) Polynomial Model of the Active Section of the Trajectory of the Carrier Missile. *Applied Radioelectronics. Status and Prospects of Development, 1st International Radioelectronic Forum MYFF–2002. Part 1. Kharkov, Ukraine*. 31–33 (in Russian).
7. Agajanov P. A., Dulevich V. E., Korostelev A. A. (1969) *Space Trajectory Measurements*. Moscow, Publishing House "Soviet Radio". <https://reallib.org/reader?file=1220987> (in Russian).
8. State Standard GOST 32453–2017. *Global Navigation Satellite System. Coordinate Systems. Methods of Transformations for Determinated Points Coordinates*. Introduced 01.07.2018.

Received: 14 July 2025

Accepted: 29 September 2025

Вклад авторов

Апочкина Е. Ф. осуществила выбор типа нейронной сети, ее обучение и исследование работы с получением результатов классификации.

Прокофьева Т. В. разработала средства имитации баллистической ракеты и радиолокационных станций для обучения нейронной сети, а также модель алгоритма с разбиением плоскости на ячейки с получением результатов его работы.

Апорович В. А. осуществил постановку задачи исследования.

Authors' contribution

Apochkina A. F. carried out the selection of a neural network type, its training and research of its operation with obtaining classification results.

Prokofieva T. V. developed tools for simulating a ballistic missile and radar stations for training a neural network, as well as the model of the algorithm with partitioning the plane into cells with the results of its operation.

Aparovich U. A. carried out the formulation of the research problem.

Сведения об авторах

Апочкина Е. Ф., инж.-програм., ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления» (ОАО «АГАТ»)

Прокофьева Т. В., вед. инж.-програм., ОАО «АГАТ»

Апорович В. А., канд. техн. наук, вед. сист. анал., ОАО «АГАТ»

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
Минск, просп. Независимости, 117
ОАО «АГАТ – системы управления» –
управляющая компания холдинга
«Геоинформационные системы управления»
Тел.: +375 29 502-64-37
E-mail: prokofieva@agat.by
Прокофьева Татьяна Владимировна

Information about the authors

Apochkina A. F., Engineer-Programmer, OJSC “AGAT – Control Systems” – Managing Company of “Geoinformation Control Systems” Holding (OJSC “AGAT”)

Prokofieva T. V., Leading Engineer-Programmer, OJSC “AGAT”

Aparovich U. A., Cand. Sci. (Tech.), Leading Systems Analyst, OJSC “AGAT”

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 117
OJSC “AGAT – Control Systems” –
Managing Company
of “Geoinformation Control Systems” Holding
Tel.: +375 29 502-64-37
E-mail: prokofieva@agat.by
Prokofieva Tatiana Vladimirovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-66-74>

УДК 004.93

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ БАЛАНСИРОВКИ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ

М. М. ЛУКАШЕВИЧ, Е. КЛИЦУНОВА

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрены методы работы с несбалансированными данными при построении моделей машинного обучения для решения задачи классификации. Проведено исследование методов балансировки с определением их влияния на эффективность классических и ансамблевых моделей. Выбраны пять наборов данных различного объема и степени дисбаланса, выполнена их предобработка. Изучено влияние реализованных в библиотеке *imbalanced-learn* методов увеличения меньшего класса, уменьшения большего класса как при изолированном применении, так и при их комбинации. Определен диапазон оптимального соотношения классов после балансировки (от 1:1 до 2:1, где первое число соотносится с количеством объектов изначально меньшего класса) и оценено влияние подбора гиперпараметров при помощи Optuna. Установлено, что оптимизация гиперпараметров не компенсирует отсутствие балансировки данных, а наилучшие показатели качества моделей достигаются применением комплексного подхода с комбинацией двух методов балансировки различных типов, использованием ансамбля и подбором гиперпараметров. Наибольший вклад в качество моделей дало применение одного метода балансировки вместе с использованием ансамбля, поэтому такую комбинацию можно рекомендовать в условиях ограниченных временных и вычислительных ресурсов. Добавление метода уменьшения большего класса и подбор гиперпараметров целесообразно проводить при достаточном количестве ресурсов и высоких требованиях к качеству модели.

Ключевые слова: классификация, машинное обучение, несбалансированные данные, балансировка данных, сравнительный анализ, классические модели, ансамбли, оптимизация гиперпараметров.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лукашевич, М. М. Экспериментальные исследования по применению методов балансировки данных в задачах классификации / М. М. Лукашевич, Е. Клицунова // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 66–74. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-66-74>.

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE APPLICATION OF DATA BALANCING METHODS IN CLASSIFICATION PROBLEMS

MARINA M. LUKASHEVICH, KATERYNA KLITSUNOVA

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This article examines methods for working with imbalanced data when building machine learning models for classification problems. Balancing methods are studied to determine their impact on the performance of classical and ensemble models. Five datasets of varying sizes and degrees of imbalance are selected and pre-processed. The impact of the *imbalanced-learn* library's methods of increasing the smaller class and decreasing the larger class is studied, both when used separately and in combination. The optimal class ratio after balancing is determined (from 1:1 to 2:1, where the first number corresponds to the number of objects in the initially smaller class), and the impact of hyperparameter selection using Optuna is assessed. It is established that hyperparameter optimization does not compensate for the lack of data balancing, and the best model performance is achieved by using an integrated approach combining two different types of balancing methods, using an ensemble, and hyperparameter selection. The greatest impact on model quality was achieved by using a single balancing method in conjunction with ensemble modeling, so this combination is recommended for limited time and computational resources. Adding a larger class reduction method and hyperparameter tuning is advisable when resources are sufficient and model quality requirements are high.

Keywords: classification, machine learning, imbalanced data, data balancing, comparative analysis, classical models, ensembles, hyperparameter tuning.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Lukashevich M. M., Klitsunova K. (2025) Experimental Studies on the Application of Data Balancing Methods in Classification Problems. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 66–74. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-66-74> (in Russian).

Введение

Несбалансированные данные – это наборы данных, в которых количество объектов одного класса существенно превышает количество объектов других классов. Наиболее характерна проблема дисбаланса классов для задач классификации: она может привести к неудовлетворительному качеству моделей машинного обучения, поскольку классические и ансамблевые алгоритмы классификации рассчитаны на равное соотношение классов. При этом стандартные метрики оценки качества моделей, такие как точность (accuracy), могут давать излишне оптимистичную оценку, даже если все объекты меньшего класса классифицируются неверно. Особенно актуальна проблема несбалансированных данных для задач, где подобная неправильная классификация может иметь серьезные последствия: например, пропуск опасного заболевания при диагностике или мошеннических действиях.

Существует большое число исследований [1–4], направленных на разработку новых методов работы с несбалансированными данными. Эти методы можно условно разделить на следующие категории: модификация моделей (как классических, так и ансамблевых) и предварительная балансировка данных.

Среди балансировок наибольшее распространение получили методы увеличения меньшего класса (oversampling) (Random Oversampling, SMOTE, B-SMOTE, B-SMOTE SVM, ADASYN) и методы уменьшения большего класса (undersampling) (Random Undersampling, NearMiss, TomekLinks, CNN, ENN, OSS, NCR). Модификации ансамблей заключаются во внедрении некоторых из указанных балансировок, а модификации алгоритмов зачастую подразумевают обучение с учетом издержек классификации, взвешивание классов или изменения алгоритма, тесно связанные с особенностями реализации конкретной модели машинного обучения.

Цель исследования – экспериментальное сравнение эффективности различных методов балансировки. Изучение изолированного применения методов уже проводилось в [5, 6], и, хотя есть исследования их комбинаций [7], им все еще уделено мало внимания. Поэтому, помимо изолированного применения балансировок с классическими и ансамблевыми моделями классификации, обращено внимание на их сочетания. Оценен вклад настройки гиперпараметров в итоговое качество моделей. Отдельное внимание уделено подбору оптимального соотношения классов после балансировки.

Методы проведения исследования

Для сравнительного анализа были выбраны пять наборов данных с платформы Kaggle с различными объемами, степенью дисбаланса, размерностью признакового пространства и тематикой. Описание выбранных наборов данных с указанием размера, типа классификации и соотношения классов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Описание выбранных наборов данных
Table 1. Description of selected datasets

Номер набора	Набор данных	Размер набора, тыс.	Тип классификации	Соотношение классов
1	Классификация здоровья плода	~2	Мультиклассовая	8:100 и 13:100
2	Прогнозирование церебрального инсульта	~43	Бинарная	2:100
3	Кредитный риск	~32		22:100
4	Классификация кредитного рейтинга	100	Мультиклассовая	17:100 и 29:100
5	Показатели здоровья при диабете	~254		2:100 и 15:100

На предварительном этапе выполнены разведочный анализ данных и предобработка. Каждый набор проверялся на наличие пропущенных значений, повторений и выбросов; пропуски заполнялись медианным значением, либо соответствующие записи удалялись, а выбросы корректировались значениями соседних точек или исключались. Категориальные признаки преобразовывались в числовой формат с использованием методов LabelEncoder. Для отбора наиболее значимых признаков применялся метод `mutual_info_classif`, нормализация числовых признаков выполнялась с помощью метода `MinMaxScaler`. Итоговая выборка делилась на тренировочную и тестовую в соотношении 70:30.

Основным языком программирования выбран Python благодаря наличию библиотеки `imbalanced-learn`, в которой реализованы методы балансировки данных. Вспомогательными библиотеками служили `Pandas`, `NumPy` и `Scikit-learn` для работы с наборами данных, `Matplotlib` и `Seaborn` для визуализации, `XGBoost` и `LightGBM` для использования ансамблевых моделей, а также фреймворк `Optuna` для подбора гиперпараметров.

В качестве основной метрики оценки применялась сбалансированная точность, вспомогательной – матрица ошибок. Сбалансированная точность определялась по формуле

$$BalancedAccuracy = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Recall_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{TP_i}{TP_i + FN_i}, \quad (1)$$

где N – количество классов в наборе данных.

Для сравнения использовались как классические алгоритмы (дерево решений, MLP, k -ближайших соседей, наивный байесовский классификатор), так и ансамблевые методы (случайный лес, градиентный бустинг, `XGBoost`, `AdaBoost` и `LightGBM`).

Изолированное применение балансировок

Классические модели классификации после применения методов балансировки в среднем демонстрировали результаты не хуже моделей, полученных на исходных данных.

Для методов увеличения меньшего класса улучшение оказалось наиболее выраженным и составляло от 1 до 56 % со средним улучшением по всем наборам данных 11 %. Особенно существенное повышение качества наблюдалось для небольших и средних наборов с ярко выраженным дисбалансом классов: для них среднее улучшение составило 14 % против 8 % в наборах данных с менее выраженным дисбалансом.

Для методов уменьшения большего класса могла наблюдаться отрицательная динамика: результат варьировался от ухудшения на 41 % до улучшения на 54 %, при этом среднее значение полученных изменений по всем наборам данных близко к нулю.

Ансамблевые модели оказались менее чувствительны к легкому и умеренному дисбалансу в наборах данных: без применения балансировок на таких наборах данных результаты оказались на 3–24 % лучше, чем у классических моделей. При этом после балансировок сбалансированная точность улучшилась в среднем на 5 %. Однако на наборах данных с сильно выраженным дисбалансом ансамблевые модели показывали значительно худшие результаты, чем классические модели: ухудшение достигало 13–23 %, его среднее значение составило 5 %. После добавления балансировки ситуация значительно менялась: результаты становились лучше, чем на исходном наборе данных с классической моделью, на 13–18 %. Однако они все еще могли не превышать результатов, полученных при использовании балансировки и классической модели. Важно отметить и то, что для больших наборов данных с заметным дисбалансом итоговая сбалансированная точность оставалась достаточно низкой (около 0,5), что ограничивает возможность практического применения таких моделей. Также для наборов данных характерно то, что чем меньше степень дисбаланса, тем больше возможных сочетаний балансировки и модели можно подобрать для получения хороших результатов.

В процессе экспериментов для соотношения классов получены показатели сбалансированной точности по выбранным наборам данных, приведенные в табл. 2. Для всех случаев улучшение (значения выделены зеленым цветом) или ухудшение (значения выделены красным цветом) в процентах определялось по сравнению со сбалансированной точностью, полученной при применении классической модели, что отражено в табл. 2. Более подробно результаты описаны в [8].

Таблица 2. Результаты экспериментов для выбранных наборов данных
Table 2. Experimental results for selected datasets

Соотношение классов	Исходный набор		Сбалансированный набор		Лучшая модель и техника балансировки
	Классическая модель	Ансамбль	Классическая модель	Ансамбль	
8:100 и 13:100	0,873	0,920 +5,38 %	0,880 +0,80 %	0,934 +6,99 %	RF – Random Oversampling RF – SMOTE RF – B-SMOTE GB – Random Undersampling GB – OSS XGBoost – Random Oversampling LightGBM – TomekLinks LightGBM – OSS
2:100	0,650	0,502 –22,77 %	0,753 +15,85 %	0,779 +19,85 %	AdaBoost – Random Oversampling
22:100	0,839	0,864 +2,98 %	0,839 +0 %	0,878 +4,65 %	XGBoost – Random Oversampling
17:100 и 29:100	0,732	0,804 +9,84 %	0,770 +5,19 %	0,825 +12,70 %	RF – Random Oversampling RF – SMOTE RF – B-SMOTE RF – B-SMOTE SVM RF – ADASYN RF – Random Undersampling
2:100 и 15:100	0,453	0,391 –13,69 %	0,490 +8,17 %	0,468 +3,31 %	GaussianNB – SMOTE GaussianNB – B-SMOTE SVM GaussianNB – ADASYN

Комбинированное применение балансировок

Для данного этапа исследования формировались пары из всех алгоритмов увеличения меньшего класса и тех алгоритмов уменьшения большего класса, что показали наилучший результат при изолированном применении. Также проводилось исследование сочетаний методов балансировки, которые описываются в литературе¹ как наиболее универсальные вне зависимости от набора данных, а именно: SMOTE с Random Undersampling, SMOTE с TomekLinks и SMOTE с ENN. Результаты представлены на рис. 1, при этом для сравнения приведены и те значения, когда использовался изолированно метод увеличения большего класса – таким значениям соответствует прочерк вместо названия метода уменьшения большего класса.

По результатам экспериментов можно говорить о том, что использование упомянутых ранее универсальных комбинаций хоть и дает неплохие результаты, однако не гарантирует получение наилучшего качества модели. В целом прирост сбалансированной точности при комбинации алгоритмов из разных категорий оказался не очень высоким и составлял до 4 %, в среднем 1–2 %. Иногда он мог быть и отрицательным, когда выбирался алгоритм уменьшения большего класса, который не приводил к значительному улучшению качества модели при изолированном применении. Так, при выборе алгоритма уменьшения большего класса, который ухудшал качество модели на первом этапе, наблюдалась значительная отрицательная динамика (до –21 %, в среднем – (–2) %) при использовании этого алгоритма даже в комбинации с более удачными вариантами. Несмотря на то что в среднем улучшение оказалось не очень значительным, пиковые значения сбалансированной точности достигались именно при комбинации балансировок.

Определение оптимального соотношения классов

Для задачи мультиклассовой классификации в качестве начального соотношения классов после балансировки бралось наибольшее из доступных значений: к примеру, для соотношений 8:100 и 13:100 начальным выбиралось 13:100. В бинарной классификации этот параметр определяет-

¹ Brownlee, J. Imbalanced Classification with Python: Better Metrics, Balance Skewed Classes, Cost-Sensitive Learning / J. Brownlee // Machine Learning Mastery. 2020.

ся единственным возможным образом. До значения 100:100 соотношение увеличивалось с шагом 10, после чего шаг принимался равным 100, пока не будет получено соотношение 1000:100. График зависимости сбалансированной точности модели от соотношения классов и выбранного метода балансировки для наборов данных с бинарной классификацией представлен на рис. 2.

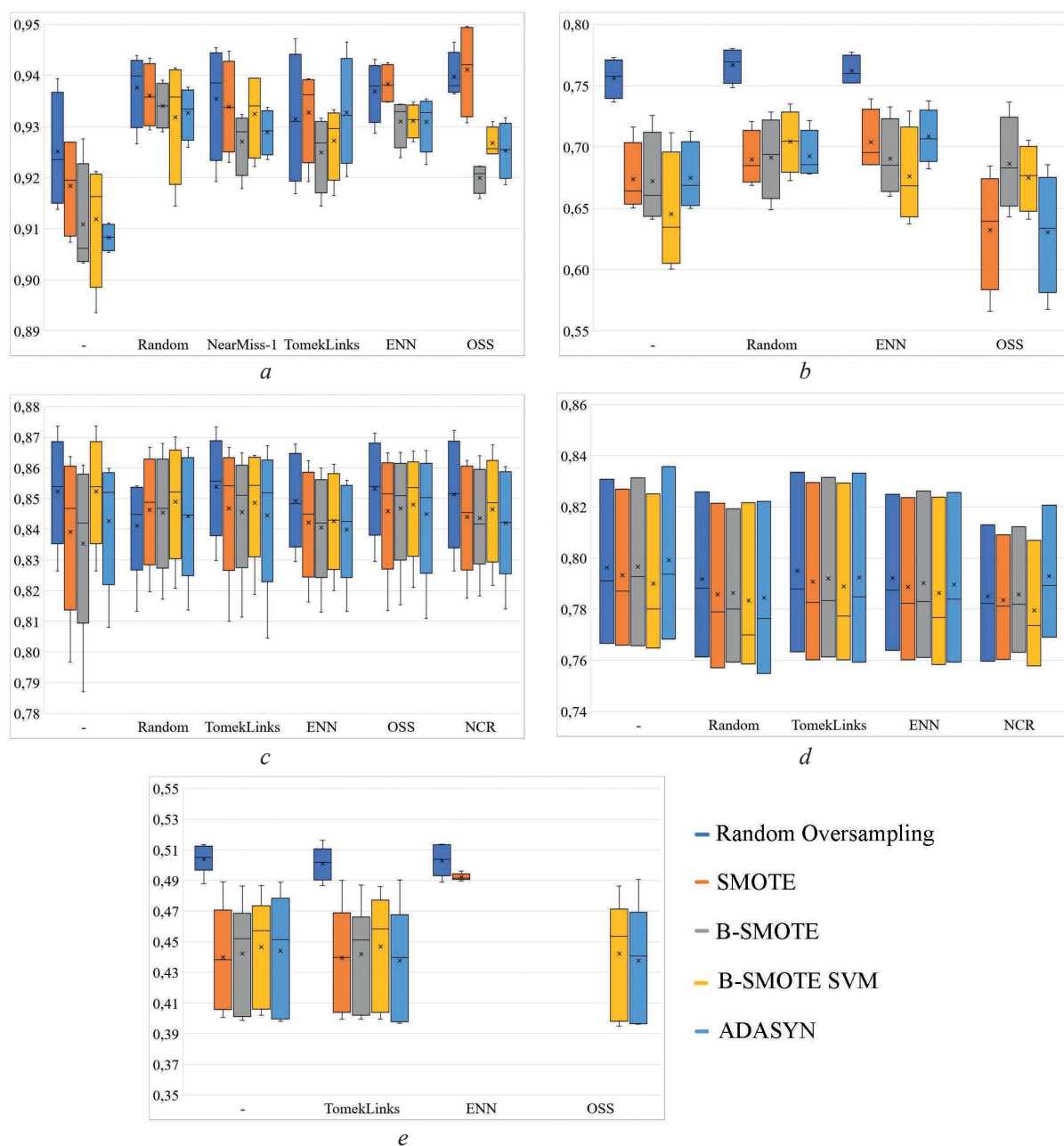


Рис. 1. Результаты комбинирования методов балансировки для набора данных:
a – «Классификация здоровья плода»; *b* – «Прогнозирование церебрального инсульта»;
c – «Кредитный риск»; *d* – «Классификация кредитного рейтинга»;
e – «Показатели здоровья при диабете»
Fig. 1. Results of combining balancing methods for a data set: *a* – “Fetal health”; *b* – “Cerebral stroke”;
c – “Credit risk”; *d* – “Credit rating”; *e* – “Diabetes health indicators”

Оптимальное соотношение классов как для бинарной, так и для мультиклассовой классификации располагается между 1:1 и 2:1 для тех методов балансировки, которые показали в целом наилучший результат. Соотношение для методов, показавших не такой хороший результат, может быть и больше (от 6:1 и более), однако такие результаты нельзя назвать показательными, если цель заключается в том, чтобы добиться глобально наилучшего качества модели на каждом шаге

ее построения. Соотношения менее 1:1 оказались неоптимальными для всех исследуемых наборов данных.

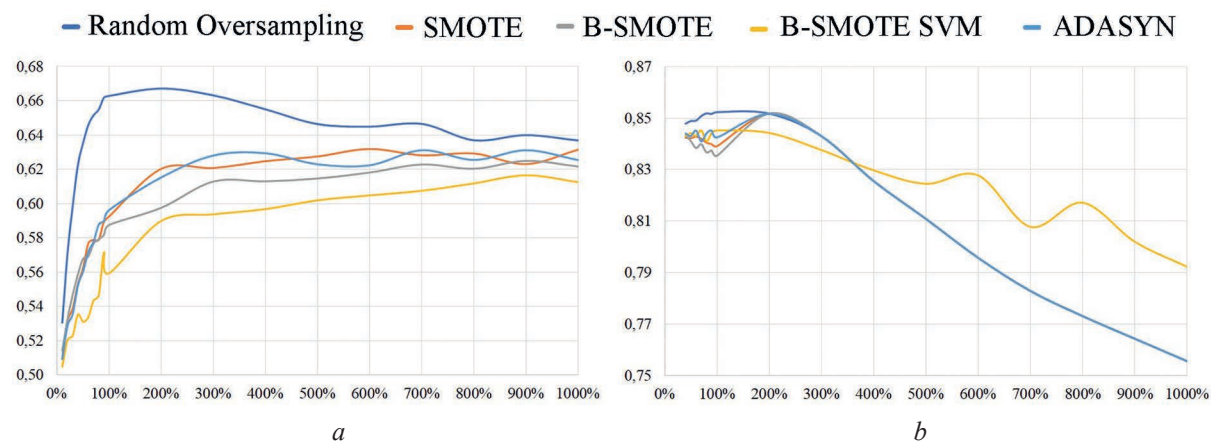


Рис. 2. Зависимости сбалансированной точности модели от соотношения классов для наборов данных:

a – «Прогнозирование церебрального инсульта»; b – «Кредитный риск»

Fig. 2. Dependences of the balanced accuracy of the model on the class ratio for data sets:

a – “Cerebral stroke”; b – “Credit risk”

Следует отметить, что для наборов данных не удалось получить единственное универсальное соотношение классов – оно оказалось вариативным в зависимости от набора данных. При этом хоть и наблюдается прирост качества модели при подборе соотношения для балансировки, разница между сбалансированной точностью на пиковом значении и на соотношении 1:1 сравнительно мала и составляет в среднем 1–3 %. В связи с чем целесообразно подбирать соотношение только при очень высоких требованиях к качеству моделей. При этом нет и явной очевидной зависимости между выраженностью исходного дисбаланса классов в наборе и смещением оптимального соотношения правее, чем 1:1.

Дополнительно была изучена эффективность двух стратегий балансировки в задаче мультиклассовой классификации: изолированная балансировка одного из классов и одновременная балансировка обоих классов. Зависимости качества модели от соотношения классов для балансировки представлены на рис. 3. Для оценки использовались наборы данных с умеренным дисбалансом и с техникой балансировки Random Oversampling.

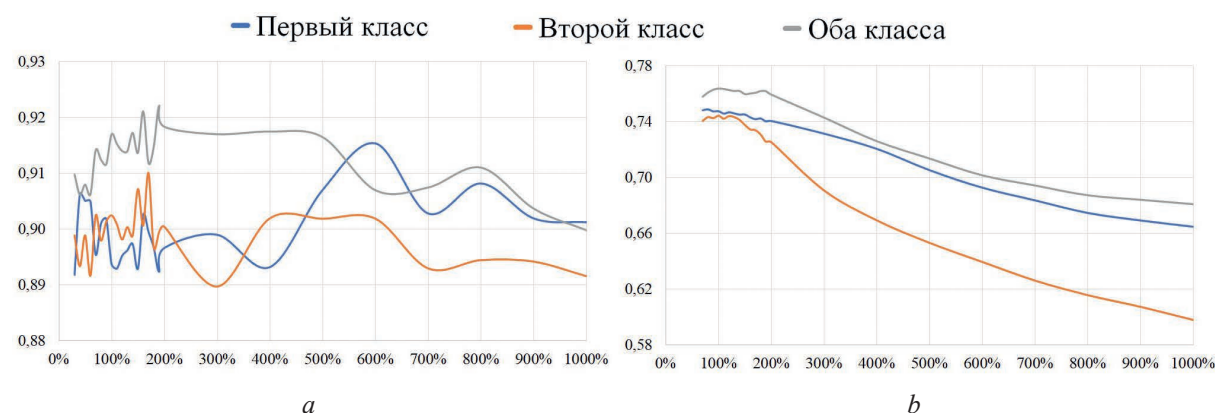


Рис. 3. Зависимость качества модели от соотношения классов для балансировки для наборов данных:

a – «Классификация здоровья плода»; b – «Классификация кредитного рейтинга»

Fig. 3. Model quality dependence on class ratio for balancing datasets: a – “Fetal health”; b – “Credit rating”

При балансировке одного класса наилучшее качество моделей наблюдалось в случае увеличения численности того из меньших классов, который изначально содержал больше объектов. Однако одновременная балансировка обоих классов обеспечивает значительно лучшие результаты по сравнению с балансировкой только одного из них. Поэтому можно рекомендовать стратегию балансировки сразу обоих классов, поскольку в данном случае качество моделей оказывается гарантированно не хуже, чем при балансировке только одного из них.

Также набор данных маленького размера реагировал на малое изменение соотношения балансировки большими скачками качества модели, а вот для набора данных большего размера графики оказались более сглаженными. Поэтому для небольших наборов данных уместным можно назвать меньший шаг при подборе соотношения классов.

Анализ влияния подбора гиперпараметров

Для анализа влияния подбора гиперпараметров использовалась байесовская оптимизация с 300 итерациями и применением алгоритма Tree-structured Parzen Estimator (TPE) фреймворка Optuna. Для всех наборов данных характерно то, что подбор гиперпараметров не смог компенсировать отсутствие балансировки данных – балансировка давала результат на 11–18 % лучше для наборов с выраженным дисбалансом и на 1–2 % лучше для наборов с легким дисбалансом по сравнению с подбором гиперпараметров. Однако качество моделей при комбинировании методов балансировки данных, ансамблевых алгоритмов и подбора гиперпараметров оказалось наилучшим.

Также можно сделать вывод о том, что чувствительность моделей к подбору гиперпараметров зависит от исходного уровня дисбаланса данных: чем сильнее выражен дисбаланс, тем более значимым оказывается эффект от настройки гиперпараметров, особенно для алгоритмов градиентного бустинга.

Алгоритмы балансировки данных, за исключением OSS, в целом оказались не очень чувствительны к подбору гиперпараметров, кроме как на наименьшем наборе данных. В среднем улучшение по всем наборам данных составило 1–4 %. Поэтому в условиях ограниченного времени можно рекомендовать подбор гиперпараметров для алгоритмов балансировки только в том случае, когда используется OSS или когда набор данных очень мал – особенно, если балансировка выполняется только одним методом.

Следует отметить также, что если модель изначально показывала худшие результаты по сравнению с другими, то даже после подбора гиперпараметров ее результаты не становились лучше, чем у тех моделей, которые изначально были сильнее и тоже проходили подбор гиперпараметров.

Вклад балансировки и настройки модели в итоговый результат

Для наглядности и визуальной оценки вклада каждого из этапов работы с набором данных была построена гистограмма, приведенная на рис. 4 и отражающая достигнутую сбалансированную точность для каждого набора. Номера наборов данных на рис. 4 приведены согласно порядку их представления в табл. 1. Видно, что применение каждой последующей техники (метод увеличения меньшего класса, ансамбль вместо классической модели, метод уменьшения большего класса и подбор гиперпараметров) позволяет увеличить сбалансированную точность в сравнении с классической моделью.

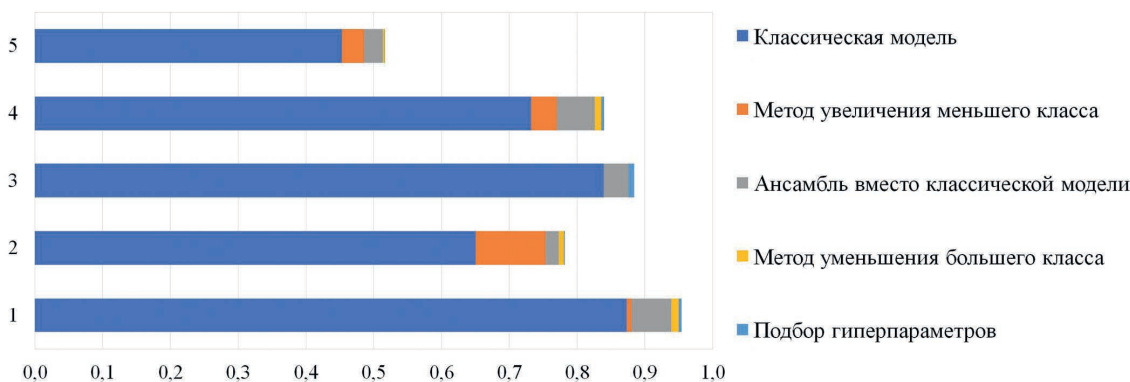


Рис. 4. Вклад этапов работы с набором данных в итоговый результат
Fig. 4. Contribution of the stages of working with a dataset to the final result

Наибольший вклад в итоговую модель давало применение одного метода балансировки. А учитывая, что пиковые значения достигались на методах увеличения меньшего класса, для решения практических задач может быть достаточно объединения одной балансировки с ансам-

блем. Вклад добавления еще одного метода балансировки (а именно – уменьшения большего класса) и подбора гиперпараметров оказался сравнительно низким, а на наборах данных большего размера еще и крайне затратным касательно временных и вычислительных ресурсов. Причем закономерности, что именно добавление второго метода или именно подбор гиперпараметров дает строго больший вклад, на рассмотренных данных нет. Поэтому нельзя рекомендовать ограничиться только одним из этих способов.

Заключение

1. Применение методов увеличения меньшего класса при использовании классических способов классификации улучшило качество моделей в среднем на 11 %, при этом наблюдалась отрицательная динамика для наборов. Методы уменьшения большего класса дали нестабильные результаты: наблюдались как ухудшение до 41 %, так и улучшение до 54 %, среднее значение по всем наборам близко к нулю. Без балансировки ансамблевые методы показывали результаты в среднем на 5 % хуже классических, с балансировкой улучшение достигало 13–18 % по сравнению с классическими моделями на исходном наборе.

2. Более выраженный эффект дали методы увеличения меньшего класса, это характерно для всех рассмотренных наборов данных. Комбинирование методов увеличения меньшего класса и уменьшения большего класса целесообразно в тех случаях, когда есть временные и вычислительные ресурсы, и требуется как можно лучшее качество модели. При этом выбирать для комбинации следует те алгоритмы, которые изолированно дают наилучший прирост качества модели. В ином случае даже использование широко распространенных и известных сочетаний может обернуться ухудшением качества модели, если изолированно эти алгоритмы из сочетания не дают значимого положительного результата.

3. Оптимальное соотношение классов после балансировки для большинства рассмотренных наборов данных находится в диапазоне между 1:1 и 2:1, где первое число соотносится с количеством объектов изначально меньшего класса. Нецелесообразными оказались балансировка с соотношением менее 1:1 и балансировка только одного меньшего класса вместо всех в мультиклассовой классификации. При этом прирост качества моделей при подборе соотношения классов оказался не очень выраженным и составил 1–3 %. Поэтому в условиях ограниченных временных ресурсов можно рекомендовать балансировку до уровня 1:1 или 2:1 без более тщательного подбора точного соотношения.

4. Для всех рассмотренных наборов данных отсутствие балансировки не компенсировалось подбором гиперпараметров. Качество моделей при комбинировании метода увеличения меньшего класса, метода уменьшения большего класса, ансамблевого алгоритма и подбора гиперпараметров оказалось наилучшим. Наибольший вклад при этом внесли увеличение меньшего класса и использование ансамблевой модели вместо классической.

Список литературы

1. Classification of Imbalanced Data: Review of Methods and Applications / P. Kumar [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2021. Vol. 1099, No 1.
2. Krawczyk, B. Learning from Imbalanced Data: Open Challenges and Future Directions / B. Krawczyk // Progress in Artificial Intelligence. 2016. Vol. 5, No 4. P. 221–232.
3. Branco, P. A Survey of Predictive Modeling on Imbalanced Domains / P. Branco, L. Torgo, R. Ribeiro // ACM Computing Surveys (CSUR). 2016. Vol. 49, No 2. P. 1–50.
4. Sun, Y. Classification of Imbalanced Data: A Review / Y. Sun, A. K. C. Wong, M. S. Kamel // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. 2009. Vol. 23, No 4. P. 687–719.
5. Kim, M. An Empirical Evaluation of Sampling Methods for the Classification of Imbalanced Data / M. Kim, K. B. Hwang // PLoS One. 2022. Vol. 17, No 7.
6. Dube, L. Enhancing Classification Performance in Imbalanced Datasets: A Comparative Analysis of Machine Learning Models / L. Dube, T. Verster // Data Science in Finance and Economics. 2023. Vol. 3, No 4. P. 354–379.
7. Khan, A. A Review of Ensemble Learning and Data Augmentation Models for Class Imbalanced Problems: Combination, Implementation and Evaluation / A. Khan, O. Chaudhari, R. Chandra // Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 244.

8. Клицунова, Е. Сравнительный анализ методов балансировки данных для задач машинного обучения / Е. Клицунова, М. М. Лукашевич // BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиозлек., 2025. С. 74–83.

Поступила 18.06.2025

Принята в печать 18.07.2025

References

1. Kumar P., Bhatnagar R., Gaur K., Bhatnagar A. (2021) Classification of Imbalanced Data: Review of Methods and Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 1099 (1).
2. Krawczyk B. (2016) Learning from Imbalanced Data: Open Challenges and Future Directions. *Progress in Artificial Intelligence*. 5 (4), 221–232.
3. Branco P., Torgo L., Ribeiro R. (2016) A Survey of Predictive Modeling on Imbalanced Domains. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 49 (2), 1–50.
4. Sun Y., Wong A. K. C., Kamel M. S. (2009) Classification of Imbalanced Data: A Review. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 23 (4), 687–719.
5. Kim M., Hwang K. B. (2022) An Empirical Evaluation of Sampling Methods for the Classification of Imbalanced Data. *PLoS One*. 17 (7).
6. Dube L., Verster T. (2023) Enhancing Classification Performance in Imbalanced Datasets: A Comparative Analysis of Machine Learning Models. *Data Science in Finance and Economics*. 3 (4), 354–379.
7. Khan A., Chaudhari O., Chandra R. (2024) A Review of Ensemble Learning and Data Augmentation Models for Class Imbalanced Problems: Combination, Implementation and Evaluation. *Expert Systems with Applications*. 244.
8. Klitsunova K., Lukashevich M. M. (2025) Comparative Analysis of Data Balancing Methods. *BIG DATA and Advanced Analytics, Collection of Scientific Articles of XI International Scientific and Practical Conference*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 74–83 (in Russian).

Received: 18 June 2025

Accepted: 18 July 2025

Вклад авторов

Лукашевич М. М. разработала концепцию исследования, провела постановку задачи, подбор ключевых источников и инструментальных методов исследования, выбрала метрики оценки качества моделей, подготовила текст рукописи.

Клицунова Е. осуществила подбор наборов данных, провела экспериментальное исследование, выполнила анализ результатов, подготовила текст рукописи.

Authors' contribution

Lukashevich M. M. developed the concept of the study, formulated the problem, selected key sources and instrumental research methods, chose metrics for assessing the quality of models, prepared the text of the paper.

Klitsunova K. selected datasets, conducted the experimental study, analyzed the results, prepared the text of the paper.

Сведения об авторах

Лукашевич М. М., канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационных систем управления, Белорусский государственный университет

Клицунова Е., бакалавр информатики, Белорусский государственный университет

Information about the authors

Lukashevich M. M., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Management Systems, Belarusian State University

Klitsunova K., Bachelor of Computer Science, Belarusian State University

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
Минск, просп. Независимости, 4
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 29 709-06-08
E-mail: lukashevichmm@bsu.by
Лукашевич Марина Михайловна

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 4
Belarusian State University
Tel.: +375 29 709-06-08
E-mail: lukashevichmm@bsu.by
Lukashevich Marina Mikhailovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-75-82>

УДК 004.312

УПРАВЛЕНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫМ СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕМЕНТА ПАМЯТИ С ЦЕЛЮ ГЕНЕРАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ ДАННЫХ

М. Н. КАЙКЫ, А. А. ИВАНЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Предлагается новая схема построения генераторов истинно случайных последовательностей с использованием блока управления источниками случайности. В качестве источника случайности рассматривается обобщенный управляемый бистабильный элемент, для которого предложена логическая модель на основе управляемых инверторов с обратной связью. Установлено, что переход бистабильного элемента в состояние метастабильности возможен независимо от его внутренней структуры. Метастабильное состояние выражается в осцилляции выходного сигнала с уникальной частотой, что в дальнейшем позволит генерировать непредсказуемые случайные последовательности. Созданная программная модель управляемого бистабильного элемента на языке SystemVerilog в процессе тестирования доказала свою состоятельность.

Ключевые слова: управляемый бистабильный элемент, генератор истинно случайного числа, физически неклонированная функция, аналитическая модель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают искреннюю благодарность резиденту ПВТ компании «Инженерный Центр Ядро», которая является одним из центров разработки YADRO, за предоставленное оборудование для проведения экспериментов в рамках работы совместной учебной лаборатории с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники.

Для цитирования. Кайки, М. Н. Управление метастабильным состоянием элемента памяти с целью генерации случайных данных / М. Н. Кайки, А. А. Иванюк // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 75–82. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-75-82>.

CONTROL OF THE METASTABLE STATE OF A MEMORY ELEMENT FOR THE PURPOSE OF RANDOM DATA GENERATION

MIKHAIL N. KAIKY, ALEXANDER A. IVANIUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A new scheme for constructing truly random sequence generators using a randomness source control unit is proposed. A generalized controlled bistable element is considered as a source of randomness, for which a logical model based on controlled feedback inverters is proposed. It is established that the transition of a bistable element to a metastable state is possible regardless of its internal structure. The metastable state is expressed in oscillation of the output signal with a unique frequency, which will further allow generating unpredictable random sequences. The created software model of a controlled bistable element in the SystemVerilog language proved its viability during testing.

Keywords: controlled bistable element, true random number generator, physically unclonable function, analytical model.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors express their sincere gratitude to the HTP resident company “Engineering Center Yadro”, which is one of the YADRO development centers, for providing equipment for conducting experiments within the framework of the joint educational laboratory with the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

For citation. Kaiky M. N., Ivaniuk A. A. (2025) Control of the Metastable State of a Memory Element for the Purpose of Random Data Generation. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 75–82. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-75-82> (in Russian).

Введение

С развитием технологий и увеличением потребностей в безопасной передаче и хранении информации актуальным является вопрос генерации случайных чисел. Генераторы случайных чисел лежат в основе множества криптографических систем, протоколов передачи данных, механизмов защиты от атак по побочным каналам, используемых в современных устройствах и приложениях. Так, в системах на кристалле применяются два типа генераторов: генераторы истинно случайных чисел (ГИСЧ) и генераторы псевдослучайных чисел, при этом именно ГИСЧ являются основой и неотъемлемой частью систем защиты информации и безопасности цифровых устройств благодаря возможности генерировать невоспроизводимые, непредсказуемые последовательности чисел, обладающие характеристиками, близкими к случайным.

Современные ГИСЧ основаны на источниках энтропии типа физически неклонируемой функции (ФНФ) [1], а сами методы генерации относятся к определению физической криптографии [2]. ФНФ – это функции, свойства которых таковы, что становится невозможным создать точную копию (или клонирование) их поведения. ФНФ основываются на протекании неуправляемых физических процессов в интегральной микросхеме (ИС), например, на колебаниях квантовых частиц, шуме в электронных компонентах, на технологических вариациях при изготовлении ИС (разброс параметров транзисторов, таких как длина канала, пороговое напряжение, неоднородность металлизации и др.). ФНФ описываются значениями пар «запрос–ответ» (Challenge-Response Pair, CRP) и являются функциями преобразования запросов C_i в ответы R_i .

Обобщенная схема генератора истинно случайных чисел

Построение ГИСЧ в настоящее время является перспективным и значимым процессом при проектировании современных защищенных и доверенных устройств, систем на кристалле. При этом структура генератора описывается в ряде международных и государственных стандартов, таких как NIST SP 800–90 (A, B, C)¹ и TC 26.4.001–2019 [3]. На рис. 1 предлагается усовершенствованная обобщенная схема для построения ГИСЧ на основе цифровых систем, элементной базы программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и заказных ИС.

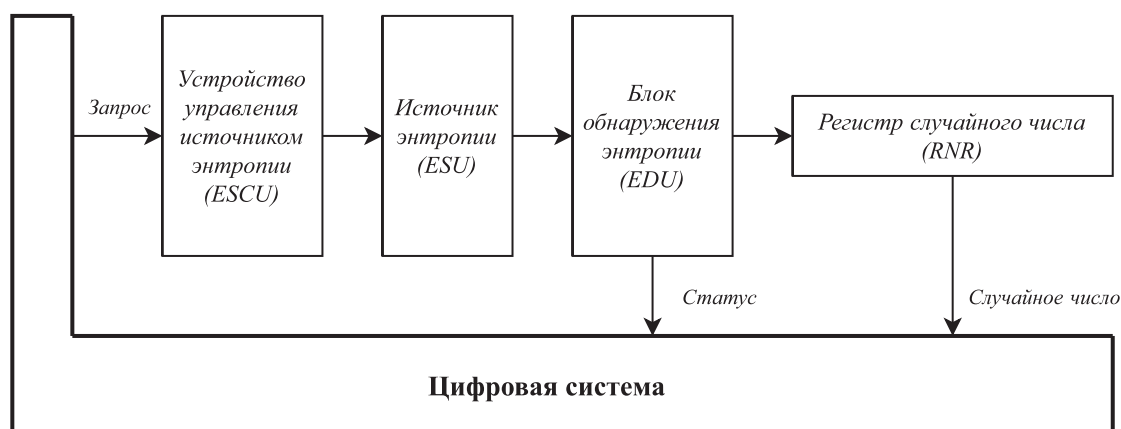


Рис. 1. Усовершенствованная схема генератора истинно случайных последовательностей

Fig. 1. Improving the true random sequence generator circuit

¹ Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators (Revised) [Electronic Resource]. Mode of access: <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/90/r1/final>.

В конечном устройстве, реализованном в виде цифровой системы, в некоторый момент времени формируется запрос на генерацию случайного числа. Данный запрос адресуется в устройство управления источником энтропии ESCU (Entropy Source Control Unit), который, в свою очередь, формирует серию из управляющих сигналов для источника энтропии ESU (Entropy Source Unit). В проводимом исследовании источник энтропии представлял собой цифровой управляемый бистабильный элемент, способный контролируемо переходить в состояние метастабильности и формировать на выходе источника случайные биты информации. Сгенерированные случайные биты поступают на вход блока обнаружения энтропии EDU (Entropy Detecting Unit), который, в свою очередь, проводит оценку качества выработанной случайной последовательности по некоторым статистическим критериям [3]. При их успешном прохождении случайная последовательность попадает в регистр случайного числа RNR (Random Number Register) для дальнейшего использования в цифровой системе.

Физически неклонируемые функции на базе элементов памяти

ФНФ на основе элементов памяти как источник случайности для генераторов истинно случайных чисел получили большое распространение в современных IoT-устройствах и TPM (Trusted Platform Module) ввиду низких аппаратных затрат на их реализацию и высокой энергоэффективности [4]. ФНФ основываются на неконтролируемых вариациях производственного процесса при изготовлении ИС и позволяют извлекать уникальные и непредсказуемые данные при инициализациях ИС или во время ее работы. Популярными примерами ФНФ на элементах памяти являются ФНФ типов SRAM [5], «Арбитр» [6], «Бабочка» [7]. Принцип работы ФНФ типа «Арбитр» основан на различиях в задержках распространения сигналов в идентичных логических цепях, а сам блок «Арбитра» при этом реализуется на D-триггерах или защелках, которые чувствительны к времени предустановки (tsetup) и времени удержания (thold) сигналов на его входе, нарушение которых приводит к попаданию «Арбитра» в состояние метастабильности и генерации случайного ответа R на его выходе. SRAM – это тип ФНФ, использующий хаотичное поведение ячеек памяти при включении питания для генерации уникальных и непредсказуемых значений. Основными причинами попадания ячеек памяти в различные состояния инициализации являются технологические вариации при производстве, приводящие к различной подвижности носителей заряда из-за неоднородности кремния, разным пороговым напряжениям, флуктуациям легирования, к неидентичной геометрии каналов и затворов на транзисторах. Вне зависимости от выбираемого типа ФНФ в их структуре всегда присутствует бистабильный элемент памяти, выполняющий роль источника энтропии для ФНФ типа SRAM или ФНФ на базе кольцевого осциллятора, или являющийся мажоритарным элементом для ФНФ типа «Арбитр». Повсеместная применимость бистабильных элементов памяти в структурах ФНФ для проектирования источников энтропии приводит к необходимости моделирования процессов, влияющих на их поведение.

Аналитическая модель бистабильного элемента памяти как источника энтропии

Рассмотрим функциональную модель бистабильного элемента памяти (рис. 2), главную роль в котором играет предлагаемая модель конфигурируемого переключающего элемента – управляемого инвертора. Предлагаемая аналитическая модель описывает поведение элемента памяти, состоящего из двух управляемых инверторов с обратной связью. Особенность подхода – выявление зависимости задержек в переключающих элементах от управляющих сигналов, что открывает возможности для оптимизации параметров ячейки памяти в процессе проектирования.

Полученные аналитические соотношения могут быть использованы как при ручном расчете временных параметров схемы, так и в алгоритмах автоматизированного проектирования цифровых устройств. Для построения аналитической модели идеального бистабильного элемента примем ряд обобщений:

- каждый бистабильный элемент состоит из идентичных, а, значит, и симметричных элементов;
- каждый из управляемых инверторов выполняет функцию инверсии по входу 1 двоичного значения;
- количество управляемых инверторов в петле обратной связи является четным, минимальное количество инверторов – два;

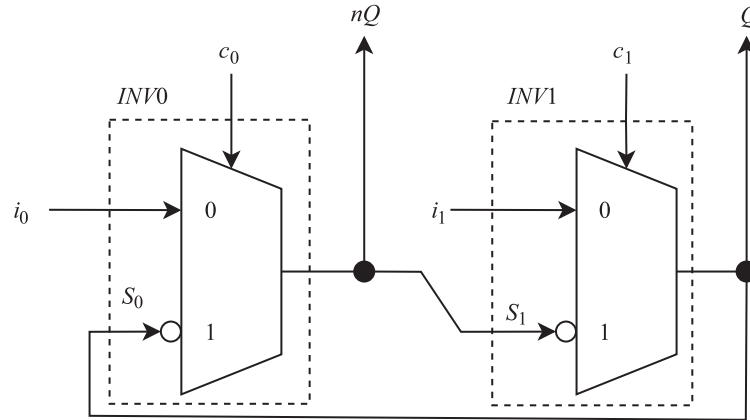


Рис. 2. Функциональная модель бистабильного элемента памяти на управляемых инверторах
Fig. 2. Functional model of a bistable memory element on controlled inverters

- бистабильный элемент способен работать в открытом режиме – режиме предустановки для передачи входного произвольного значения $\{0,1\}$ на свой выход;
 - бистабильный элемент способен работать в закрытом режиме – режиме сохранения.
- Рассмотрим обобщенную модель управляемого инвертора на примере *INV0*:

$$nQ = \overline{S_0}c_0 + i_0\overline{c_0}, \quad (1)$$

где S_0 – входной информационный символ; c_0 – управляющий вход; i_0 – вход конфигурации; nQ – символ на выходе элемента.

Описываемый управляемый инвертор является универсальным переключательным компонентом, на базе которого можно описать любой другой управляемый инвертор на уровне логических вентилей, например, операции НЕ-И, НЕ-ИЛИ, исключающее ИЛИ. Для примера опишем элемент НЕ-И при помощи введенного ранее управляемого инвертора. Примем $i_0 = 1$, тогда из уравнения (1) следует (с применением правила поглощения и закона Де Моргана): $nQ = \overline{S_0}c_0 + i_0\overline{c_0} = \overline{S_0}c_0 + \overline{c_0} = \overline{S_0 + c_0} = \overline{S_0}c_0$.

Введем понятие задержки переключения δ управляемого инвертора (где $\delta \in \mathbb{N}$) и дискретного времени t ($t \in \mathbb{N}$). При этом $\delta \ll t$. Уравнение для управляемого инвертора *INV0* примет вид: $nQ(t + \delta) = \overline{S_0(t)}c_0 + i_0\overline{c_0}$. Примем дополнительное ограничение: входы S_0 , c_0 , i_0 не подвержены задержкам и изменяют свое состояние мгновенно. С учетом введенных ограничений и полученного выражения для построения аналитической модели запишем систему уравнений для управляемого бистабильного элемента:

$$\begin{cases} nQ(t) = \overline{Q(t-\delta)}c_0 + i_0\overline{c_0}; \\ Q(t) = \overline{nQ(t-\delta)}c_1 + i_1\overline{c_1}. \end{cases} \quad (2)$$

Для (2) рассмотрим режимы работы ячейки бистабильного элемента путем перебора входных состояний на входах c_0 , c_1 . Система уравнений (2) имеет всего четыре состояния, для каждого из которых запишем состояние системы в момент времени t :

- состояние 1 элемента памяти ($c_1 = 0$, $c_0 = 1$) – Set/Reset:

$$\begin{aligned} nQ(t) &= \overline{Q(t-\delta)}c_0 + i_0\overline{c_0} = \overline{Q(t-\delta)}; \\ Q(t) &= \overline{nQ(t-\delta)}c_1 + i_1\overline{c_1} = i; \\ nQ(t+\delta) &= \overline{Q(t)} = \overline{i}; \end{aligned}$$

- состояние 2 элемента памяти ($c_1 = 1$, $c_0 = 0$) – Reset/Set (следует отметить, что в случае состояний Set/Reset их кодирование зависит от входа конфигурации i , например, при $i = 0$ состояние элемента 1 будет соответствовать состоянию установки, а при $i = 1$ – состоянию сброса):

$$Q(t) = \overline{nQ(t-\delta)}c_1 + i_1\overline{c_1} = \overline{nQ(t-\delta)};$$

$$nQ(t) = \overline{Q(t-\delta)}c_0 + \overline{ic_0} = i;$$

$$Q(t+\delta) = i;$$

– состояние 3 элемента памяти ($c_1 = 1, c_0 = 1$) – Store:

$$Q(t) = \overline{nQ(t-\delta)}c_1 + \overline{ic_1} = \overline{nQ(t-\delta)};$$

$$nQ(t) = \overline{Q(t-\delta)}c_0 + \overline{ic_0} = \overline{Q(t-\delta)};$$

– состояние 4 элемента памяти ($c_1 = c_0 = 0$) – запрещенное состояние:

$$Q(t) = \overline{nQ(t-\delta)}c_1 + \overline{ic_1} = i;$$

$$nQ(t) = \overline{Q(t-\delta)}c_0 + \overline{ic_0} = i.$$

Комбинации символов c_0, c_1 в состоянии 4 противоречат нормальному режиму работы ячейки памяти, так как выход Q приравнивается к выходу nQ .

Рассмотрим работу ячейки во времени. Для этого введем понятие транзакции – любое изменение состояния входных символов c_0, c_1 . Поскольку описанная модель оперирует двухзначным алфавитом состояний для c_0, c_1 соответственно, можно описать 12 типов транзакций в виде графа (рис. 3). Для примера проанализируем транзакцию перехода из состояния Set в состояние Store, соответствующую ребру 6 на рис. 3: для $c_1 = 0, c_0 = 1 - Q(t) = i; nQ(t) = \bar{i}$, тогда для $c_1 = 1, c_0 = 1$ в момент времени $t + \delta$ будут верны выражения:

$$\begin{cases} Q(t+\delta) = \overline{nQ(t)}c_1 + \overline{ic_1} = \overline{nQ(t)} + 0 = \overline{nQ(t)} = i; \\ nQ(t+\delta) = \overline{Q(t)}c_0 + \overline{ic_0} = \overline{Q(t)} + 0 = \overline{Q(t)} = \bar{i}. \end{cases} \quad (3)$$

Как видно из (3), ячейка, находившаяся в состоянии Set, способна перейти в состояние Store. Рассмотрим транзакцию перехода из запрещенного состояния в состояние Store, соответствующую ребру 10 на рис. 3: для $c_1 = c_0 = 1 - Q(t) = nQ(t) = i$, тогда для $c_1 = 1, c_0 = 1$ в момент времени $t + \delta$ будут верны выражения:

$$\begin{cases} Q(t+\delta) = \overline{nQ(t)}c_1 + \overline{ic_1} = \overline{nQ(t)} + 0 = \overline{nQ(t)} = \bar{i}; \\ nQ(t+\delta) = \overline{Q(t)}c_0 + \overline{ic_0} = \overline{Q(t)} + 0 = \overline{Q(t)} = \bar{i}. \end{cases} \quad (4)$$

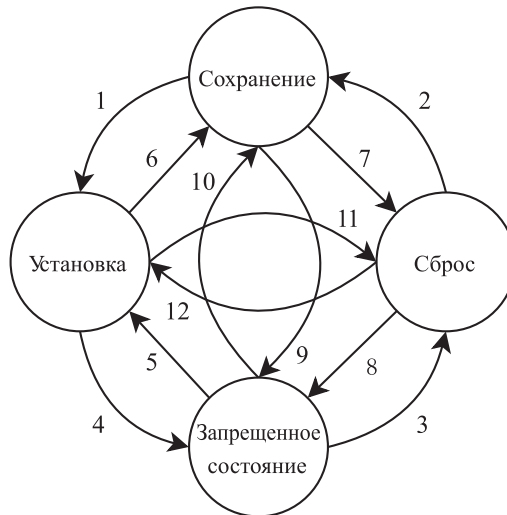


Рис. 3. Граф переходов между состояниями элемента памяти
Fig. 3. State transition graph of a memory element

Согласно (4), ячейка, находившаяся в запрещенном состоянии и имеющая значения выходов, равные i , переходит в состояние выходов $\bar{i}$, что соответствует операции инверсии выходных состояний ячейки, и переходит в режим автоколебаний. Ввиду того, что аналитическая модель

не предусматривает девиации задержек и разброс технологических параметров транзисторов, колебания будут являться незатухающими. Доказать это можно при помощи уравнений:

$$\begin{cases} Q(t + k\delta) = \overline{nQ(t + (k\delta - \delta))c_1 + ic_1}; \\ nQ(t + k\delta) = \overline{Q(t + (k\delta - \delta))c_0 + ic_0}. \end{cases} \quad (5)$$

Подставим в выражение (5) различные значения k ($k \in N$), доказав периодичность изменения знака на выходе модели элемента, и вычислим период его колебаний (период колебаний $P_{osc} = 2\delta$):

$$\begin{cases} Q(t + \delta) = \bar{i} \\ nQ(t + \delta) = \bar{i} \end{cases}; \begin{cases} Q(t + 2\delta) = i \\ nQ(t + 2\delta) = i \end{cases}; \begin{cases} Q(t + 3\delta) = \bar{i} \\ nQ(t + 3\delta) = \bar{i} \end{cases}; \begin{cases} Q(t + 4\delta) = i \\ nQ(t + 4\delta) = i \end{cases}. \quad (6)$$

В отличие от аналитической модели, в реальном устройстве вследствие протекающих переходных процессов между управляемыми инверторами в схеме и их асимметрии в физической реализации ($\delta_{INV0} \neq \delta_{INV1}$) подобные автоколебания являются затухающими [8]. Докажем, что для построенной аналитической модели, несмотря на бесконечные колебания на выходах ячейки, по-прежнему возможен переход из состояния колебаний в детерминированное состояние при помощи операций Set или Reset. Для этого пусть элемент памяти находится в состоянии колебаний, тогда его состояния соответствуют выражениям $Q(t + \delta) = nQ(t + \delta) = \bar{i}$; $Q(t + 2\delta) = nQ(t + 2\delta) = i$. В момент времени $t + 3\delta$ на вход элемента памяти поступают значения $c_1 = 0$, $c_0 = 1$, соответствующие транзакции установки. Тогда будут выполняться равенства:

$$\begin{cases} Q(t + 3\delta) = \overline{nQ(t + 2\delta)c_0 + ic_0} = \overline{nQ(t + 2\delta)} = i; \\ nQ(t + 3\delta) = \overline{Q(t + 2\delta)c_1 + ic_1} = i; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Q(t + 4\delta) = \overline{nQ(t + 3\delta)} = \bar{i}; \\ nQ(t + 4\delta) = \overline{Q(t + 3\delta)c_1 + ic_1} = i. \end{cases} \quad (8)$$

Как видно из (7), (8), ячейка перешла в состояние $Q(t + 4\delta) = i$; $nQ(t + 4\delta) = \bar{i}$, что соответствует ее нормальному режиму работы и состоянию.

SystemVerilog-модель на базе аналитической модели бистабильного элемента

На высокоуровневом языке описания цифровых схем SystemVerilog с использованием подмножества несинтезируемых конструкций была разработана функциональная модель бистабильного элемента памяти согласно выражению (2) и в соответствии с рис. 2. Модель размещалась в тестовом окружении SystemVerilog для последующего моделирования, которое проводилось в среде Vivado XSIM, при этом $\delta = 10ns$.

На рис. 4 приведена временная диаграмма работы SystemVerilog модели упомянутого ранее бистабильного элемента памяти. Как видно из рисунка, модель элемента корректно реагирует на транзакции чтения, сброса, установки, а также способна переходить в состояние незатухающих автоколебаний на своих выходах. Регистрацию автоколебаний на выходе защелки предлагается выполнять в блоке EDU, например, с использованием блока семплирования данных при помощи системной частоты или выделенной частоты семплирования.

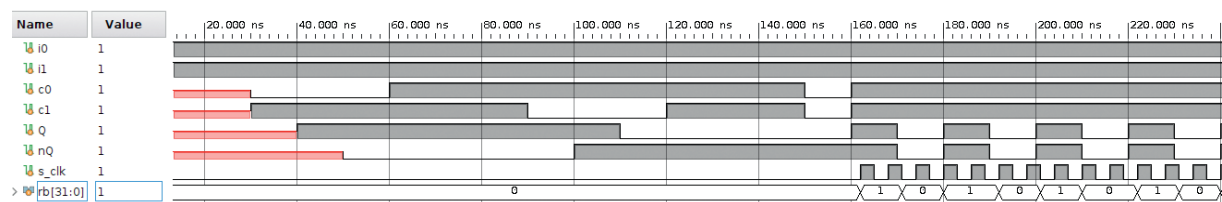


Рис. 4. Временная диаграмма работы бистабильного элемента с семплированием случайных данных

Fig. 4. Timing diagram of a bistable element with random data sampling

На рис. 4, согласно выражению (7) и моделированию, период осцилляции элемента памяти принят $P_{osc} = 2\delta = 20ns$, а период семплирования сигналом $s_clk - P_{sample} = 3ns$. При этом на выходе устройства семплирования можно наблюдать двоичную последовательность символов «11011100100110», которая в дальнейшем может быть использована как случайные данные для размещения в RNR.

Заключение

1. Предложена модель управляемого бистабильного элемента памяти с целью генерации случайных чисел. В отличие от традиционных подходов, представленная архитектура генератора истинно случайных чисел включает устройство управления источником энтропии (ESCU), что позволяет не только детектировать, но и контролировать недетерминированное поведение элементов памяти.

2. Разработана аналитическая модель бистабильного элемента памяти на управляемых инверторах, описывающая его поведение в различных режимах работы, включая переход в метастабильное состояние для генерации случайных данных. Показано, что при нарушении условий устойчивости элемент памяти способен переходить в режим автоколебаний, что может быть использовано для извлечения энтропии.

3. Проведено моделирование предложенной модели на языке SystemVerilog, подтвердившее возможность управления метастабильностью и регистрации случайных последовательностей. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования элементов памяти в качестве источника энтропии для генераторов истинно случайных чисел, особенно в условиях ограниченных аппаратных ресурсов, таких как IoT-устройства.

4. Дальнейшие исследования направлены на оптимизацию параметров управления метастабильным состоянием, а также на экспериментальную верификацию предложенного подхода на реальных интегральных схемах с учетом технологических вариаций.

Список литературы

1. Silicon Physical Random Functions / B. Gassend [et al.] // Proc. of the 9th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS '02). 2002. P. 148–160.
2. Иванюк, А. А. Физическая криптография и защита цифровых устройств / А. А. Иванюк, С. С. Заливако // Доклады БГУИР. 2019. № 2. С. 50–58.
3. Физические генераторы случайных чисел для применения в СКЗИ, не содержащих сведения, составляющие государственную тайну: ТС 26.4.001–2019.
4. Refillable PUF Authentication Protocol for Constrained Devices / A. Desuert [et al.] // Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments. 2022. Vol. 14. P. 1–18.
5. Кайки, М. Н. Исследование стабильности промышленной SRAM памяти, используемой для неклонируемой идентификации / М. Н. Кайки, А. А. Иванюк // Информационные технологии и системы 2022 (ИТС 2022): матер. Междунар. науч. конф., Минск, 23 нояб. 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиэлек., 2022. С. 79–80.
6. Иванюк, А. А. Физически неклонируемая функция типа АРБИТР с нелинейными парами путей / А. А. Иванюк, А. Ю. Шамина // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. № 1. С. 54–62.
7. Kumar, S. S. The Butterfly PUF: Protecting IP on Every FPGA / S. S. Kumar // Proc. IEEE International Workshop on Hardware-Oriented Security and Trust (HOST'2008). USA, CA: Anaheim, 2008. P. 67–70.
8. Kacprzak, T. Analysis of Oscillatory Metastable Operation of an RS Flip-Flop / T. Kacprzak // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1988. Vol. 23, No 2. P. 260–266.

Поступила 20.06.2025

Принята в печать 15.07.2025

References

1. Gassend B., Clarke D., Van Dijk M., Devadas S. (2002) Silicon Physical Random Functions. *Proc. of the 9th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS '02)*. 148–160.
2. Ivaniuk A. A., Zalivaka S. S. (2019) Physical Cryptography and Security of Digital Devices. *Doklady BGUIR*. (2), 50–58 (in Russian).
3. Technical Specifications TS 26.4.001–2019. *Physical Random Number Generators for Use in Cryptographic Information Protection Tools That Do Not Contain Information Constituting a State Secret* (in Russian).

4. Desuert A., Chollet S., Pion L., Hély D. (2022) Refillable PUF Authentication Protocol for Constrained Devices. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*. 14, 1–18.
5. Kaiky M. N., Ivaniuk A. A. (2022) Research of the Stability of Industrial SRAM Memory Used for Unclonable Identification. *Information Technologies and Systems 2022 (ITS 2022), Proceedings of the International Scientific Conference, Minsk, Nov. 23*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 79–80 (in Russian).
6. Ivaniuk A. A., Shamina A. Y. (2023) Physically Non-Cloneable Arbiter-Type Function with Non-Linear Path Pairs. *Systems Analysis and Applied Informatics*. (1), 54–62 (in Russian)
7. Kumar S. S. (2008) The Butterfly PUF: Protecting IP on Every FPGA. *Proc. IEEE International Workshop on Hardware-Oriented Security and Trust (HOST'2008)*. USA, CA, Anaheim. 67–70.
8. Kacprzak T. (1988) Analysis of Oscillatory Metastable Operation of an RS Flip-Flop. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 23 (2), 260–266.

Received: 20 June 2025

Accepted: 15 July 2025

Вклад авторов

Кайки М. Н. построил аналитическую модель управляемого бистабильного элемента с целью генерации случайных чисел, доказал пригодность модели при помощи программной модели на SystemVerilog и симуляции, проанализировал и обобщил полученные результаты.

Иваниук А. А. осуществил постановку задачи для проведения исследования, принял участие в обобщении результатов.

Authors' contribution

Kaiky M. N. constructed an analytical model of a controlled bistable element for the purpose of generating random numbers, proved the suitability of the model using a software model on SystemVerilog and simulation, analyzed and generalized the obtained results.

Ivaniuk A. A. carried out the formulation of the problem for the study, took part in the generalization of the results.

Сведения об авторах

Кайки М. Н., магистр техн. наук, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Иваниук А. А., д-р техн. наук, проф., проф. каф. информатики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Information about the authors

Kaiky M. N., M. Sci. (Tech.), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Ivaniuk A. A., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Computer Science, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 386-91-82
E-mail: kaikymykhailo@gmail.com
Кайки Михаил Николаевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 386-91-82
E-mail: kaikymykhailo@gmail.com
Kaiky Mikhail Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-83-92>

УДК 004.457

КРОСС-ПЛАТФОРМЕННЫЙ АНАЛИЗАТОР ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПАКЕТА КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ OpenMX

А. В. БАГЛОВ^{1,2}, Л. С. ХОРОШКО^{1,2}

¹Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье описаны архитектура и функциональность кросс-платформенного анализатора зонной структуры для обработки результатов расчета популярного специализированного пакета моделирования свойств материалов OpenMX. Продемонстрирована его работа на примере тестового задания. Представлены коммерческие пакеты для анализа и обработки данных, получаемых в программах для квантово-механического моделирования материалов. Показано, что пакету OpenMX недостает программы-анализатора для обработки результатов расчетов строения зонной структуры материалов. Рассмотрены практические задачи анализа расчетов зонной структуры материалов и функциональность такой программы, сформулированы требования к ее реализации. Предлагаемый анализатор по общим временным затратам не уступает по производительности существующему аналогу, при этом имеет более широкий функционал, включая базовый анализ и постобработку данных с возможностью опциональной настройки выходного файла, сохраняемого в удобном текстовом формате. Данная разработка перспективна в контексте универсализации для обеспечения совместимости с другими широко применяемыми коммерческими пакетами квантово-механического моделирования.

Ключевые слова: электронная структура, моделирование, энергетические зоны, анализ данных, пост-обработка, программирование, C++, Gnuplot, OpenMX.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы благодарят А. В. Козич и А. С. Сиротюка за их посильный вклад в тестирование разработанного программного обеспечения.

Для цитирования. Баглов, А. В. Кросс-платформенный анализатор зонной структуры материалов для пакета квантово-механического моделирования OpenMX / А. В. Баглов, Л. С. Хорошко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 83–92. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-83-92>.

CROSS-PLATFORM MATERIAL BAND STRUCTURE ANALYZER FOR THE OpenMX QUANTUM MECHANICAL MODELING PACKAGE

ALEKSEY V. BAGLOV^{1,2}, LIUDMILA S. KHOROSHKO^{1,2}

¹Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article describes the architecture and functionality of a cross-platform band structure analyzer for processing the calculation results of the popular specialized OpenMX material properties modeling package. Its operation is demonstrated using a test task as an example. Commercial packages for analyzing and processing data obtained in programs for quantum mechanical modeling of materials are presented. It is shown that the OpenMX package lacks an analyzer program for processing the results of calculations of the structure of materials. Practical problems of analyzing the calculations of the band structure of materials and the functionality of such a program are considered, and requirements for its implementation are formulated. The proposed analyzer is not inferior in performance to the existing analog in terms of overall time costs, while it has a wider

functionality, including basic analysis and post-processing of data with the ability to optionally customize the output file saved in a convenient text format. This development is promising in the context of universalization to ensure compatibility with other widely used commercial quantum mechanical modeling packages.

Keywords: electronic structure, modelling, energy bands, data analysis, postprocessing, programming, C++, Gnuplot, OpenMX.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors thank A. V. Kozich and A. S. Sirotyuk for their contribution to testing the developed software.

For citation. Baglov A. V., Khoroshko L. S. (2025) Cross-Platform Material Band Structure Analyzer for the OpenMX Quantum Mechanical Modeling Package. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 83–92. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-83-92> (in Russian).

Введение

В настоящее время в вычислительной физике конденсированного состояния разработано большое количество теоретических методов для описания материалов произвольного состава и атомарно-кристаллического строения на языке фундаментальной физики. На практике широко применяется численное квантово-механическое моделирование методами из первых принципов как хорошо зарекомендовавший себя, эффективный и надежный подход для исследования и описания широкого спектра свойств материалов. Получаемые в таких численных экспериментах результаты в значительной степени расширяют и дополняют результаты традиционных экспериментальных исследований.

В некоторых случаях численные эксперименты являются предпочтительными, особенно, когда проведение натурных экспериментальных исследований серьезно затруднено (например, построение фазовой диаграммы состояний вещества в области экстремальных давлений) или невозможно (например, анализ свойств соединений короткоживущих сверхтяжелых элементов). В контексте бурного развития нанотехнологий и наноматериаловедения задачи прогнозирования и исследования физических и химических свойств материалов различной размерности (в том числе в виде квантовых точек, нанотубулярных объектов, ультратонких пленок и иных наноразмерных форм) являются одними из наиболее востребованных и актуальных.

Краткий анализ состояния вопроса и постановка задачи

Численные эксперименты, направленные на исследование структурных, электронных, магнитных, оптических и прочих свойств, проводят с использованием различных специализированных пакетов, в которых реализованы разные теоретические подходы. Обычно в состав пакета входит набор программ, объединенных вокруг некоторой центральной программы. Так, например, устроен пакет Quantum ESPRESSO – интегрированный набор компьютерных программ (или приложений) для расчетов электронной структуры и моделирования материалов в наномасштабе [1]. Однако возможна и реализация всего пакета в одном исполняемом файле. Наиболее известные примеры данного подхода – пакеты VASP [2] и CASTEP [3]. Как правило, все программы в таких пакетах являются CLI-программами, т. е. взаимодействие с ними осуществляется через программный механизм CLI (Command Line Interface – интерфейс командной строки). Управление программой из пакета выполняется с помощью одного или нескольких входных файлов в текстовом формате, содержащих в себе набор инструкций, необходимых для решения поставленных в вычислительном эксперименте задач. Также в рамках работы с пакетом (программой) могут дополнительно использоваться файлы, содержащие (чаще всего в бинарном виде) результаты вычислений, выполненных предварительно самим пакетом или сторонней программой. Как показывает практика, этот подход позволяет добиваться максимальной эффективности работы исследователя и программного обеспечения (ПО). Тем не менее такая реализация взаимодействия справедливо считается не слишком «дружественной» к пользователю, что является одним из ключевых элементов высокого «порога вхождения» в данную область науки, особенно для молодых ученых и студентов.

В том числе и по этой причине разрабатываются пакеты, включающие привычный большинству GUI (Graphical User Interface – графический пользовательский интерфейс), призванный

упростить планирование, проведение и анализ численного эксперимента: построить и сразу же визуализировать атомно-кристаллическую структуру исследуемого объекта; управлять параметрами проведения численного моделирования; провести обработку результатов вычислений, в том числе на лету, и визуализировать их. К подобным решениям можно отнести продвинутые коммерческие пакеты, такие как SCM [4], QuantumATK [5], MedeA [6] и др. Хотя перечисленные пакеты самодостаточны для организации исследовательской работы в рамках численного квантово-механического моделирования и включают в себя широкий функционал доступных теоретических моделей, они могут быть сопряжены с другими пакетами, например, с VASP, и работать как «драйвер», использующий функциональные возможности присоединенного пакета вместо встроенных возможностей. Заметим, что такой вариант не является принципиально отличающимся с точки зрения устройства архитектуры коммерческих пакетов, поскольку GUI в них фактически является лишь фронтендом, автоматизирующим подготовку входных файлов для CLI-бэкенда с последующим анализом выходных результатов в удобном для исследователя виде. CLI-бэкенд, реализующий непосредственно численное моделирование, может использоваться без запуска GUI, а потому может быть заменен на произвольный после реализации соответствующих интерфейсов. Фактически одним из критериев популярности того ли иного пакета для квантово-механического моделирования являются не только его возможности, но и наличие эффективного вспомогательного ПО, реализующего различную пред- и постобработку результатов вычислений. Однако для менее популярных и некоммерческих пакетов вспомогательное ПО зачастую развито относительно слабо, либо вовсе отсутствует.

Авторы статьи в процессе работы активно применяли пакет для численного квантово-механического моделирования методами из первых принципов OpenMX, использующий теории функционала плотности и псевдопотенциала, а также базис численных атомно-центрированных численных псевдоатомных орбиталей [7–14], бесплатно распространяемый под лицензией GPLv3. Одним из важнейших аспектов исследования электронного строения материалов, особенно пониженной размерности, с которыми сталкиваются все исследователи, является изучение дисперсии энергетических зон (или зонной структуры) – спектра собственных значений оператора энергии электрона в пространстве волновых векторов, развертка которого обычно осуществляется вдоль особых точек высокой симметрии первой зоны Бриллюэна, что подробно описано в большом количестве учебных и научных изданий, например в [15, 16].

OpenMX, как большинство пакетов, рассчитывает собственные значения запрошенного числа состояний для каждой точки в пространстве волновых векторов (k -точки) и предоставляет ее пользователю в виде обычного текстового файла. Дальнейшая обработка «сырых» данных, построение, анализ и визуализация зонной структуры являются задачей исследователя. В составе пакета OpenMX присутствует программа bandgnu13, считывающая «сырые» выходные данные и приводящая их к формату, удобному для графического построения. Дополнительно bandgnu13 подготавливает скрипт для широко используемой в научном сообществе программы визуализации Gnuplot, позволяя быстро визуализировать полученный результат в операционной системе Linux. Однако предлагаемых возможностей программы bandgnu13 совершенно недостаточно для полноценной и эффективной работы исследователя. Насколько известно, существует лишь один вариант коммерческого ПО, который может использовать OpenMX как бэкенд – Winmostar, которое может проводить анализ и визуализацию только в рамках себя, без возможности экспорта данных для работы в других пакетах.

Таким образом, разработка специализированного ПО для работы с «сырыми» данными о зонной структуре, проведение их анализа, обработка и эффективное представление в удобном для исследователя формате являются востребованной и актуальной задачей. В статье описывается разработанное авторами ПО в рамках решения этой задачи – анализатор зонной структуры материалов для пакета квантово-механического моделирования OpenMX.

Описание разработанного решения

Исходя из того факта, что подавляющее большинство научных пакетов для численного квантово-механического моделирования методами из первых принципов, в том числе и OpenMX, разрабатывается для операционной системы Linux (или других Unix-подобных операционных систем), следует придерживаться таких правил разработки, которые позволят органично исполь-

зывать предлагаемое ПО в Unix, т. е. действовать в рамках принципов Макэлроя [17]. Поскольку обработка результатов часто проводится пользователями на собственных устройствах, разумным было бы обеспечить кросс-платформенный анализатор.

Для обеспечения высокой скорости и компактности было принято решение применять для написания анализатора язык программирования C++, преимущественно ввиду наличия контейнерных классов в стандартной библиотеке шаблонов STL. Как и пакеты для моделирования, включая целевой OpenMX, разработанный анализатор является CLI-приложением, что позволяет использовать его также и на устройствах без графической оболочки, например, непосредственно на вычислительных кластерах для анализа без передачи выходного файла с «сырыми» данными. Благодаря своей компактности разработанный анализатор поставляется в виде единственного исполняемого файла для Linux или Windows, включающего в себя справочную информацию и примеры задания параметров и опций для исполнения. Решение является монолитным и не требует для своей работы никаких дополнительных библиотек, кроме стандартной библиотеки C++ и математической библиотеки.

В состав пакета OpenMX входит программа bandgnu13, несколько упрощающая работу с файлом, содержащим результаты расчета зонной структуры. Программа bandgnu13 может преобразовывать результаты из файла с «сырыми» данными в файл, пригодный после некоторых ручных правок для дальнейшего импорта и визуализации с применением специального ПО: OriginLab OriginPro, IBM SPSS, MS Excel, QtiPlot и др. Для первичной визуальной оценки bandgnu13 также подготавливает входной файл для визуализации с помощью пакета Gnuplot – CLI-программы, предназначенной для построения графиков и широко используемой исследователями во всем мире. Однако для запуска Gnuplot все равно необходимо использовать терминал, а адекватный уровень визуализации требует ручной правки подготовленного программой bandgnu13 входного файла для Gnuplot. Фактически bandgnu13 является просто конвертером, а последующие анализ и визуализация данных все равно требуют участия и значительных временных затрат исследователя. Также стоит заметить, что bandgnu13 может быть скомпилирована только в операционной системе Linux.

Предлагаемый анализатор обладает значительно большей оригинальной функциональностью и работает в двух режимах:

- 1) чтение «сырых» данных, их анализ и запись результатов анализа в стандартный поток вывода;
- 2) чтение «сырых» данных, их преобразование, обработка и запись специальным образом оформленных данных в выходные файлы.

Исходя из строения «сырых» данных, получаемых в результате моделирования в пакете OpenMX, можно выделить два направления для анализа: подсистема, связанная с геометрией обратной решетки (или пространственная подсистема), и, собственно, подсистема энергетического спектра электронных состояний (или электронная подсистема).

Результат анализа пространственной подсистемы включает в себя информацию о векторах трансляции обратной решетки и координаты точек высокой симметрии, вдоль которых рассчитываются промежуточные точки. Координаты высокосимметричных точек выводятся как во внутренних координатах (в единицах решетки), так и в обычных декартовых в ортогональном репере. Как это принято в пакетах для численного квантово-механического моделирования, авторы статьи использовали атомную систему единиц, где единица измерения длины – боровский радиус, равный примерно $5,291772 \text{ \AA}$.

Результат анализа электронной подсистемы включал в себя информацию о количестве рассчитанных состояний, в том числе занятых и не занятых, энергию Ферми, количестве спин-овых каналов, участвующих в расчете. В случае пересечения зонами уровня Ферми полезно знать число таких зон, а также их индексы, что необходимо для визуализации поверхности Ферми в специализированном ПО. В случае наличия щели в энергетическом спектре электронов, т. е. если исследуемый материал является полупроводником или диэлектриком, выводятся информация о ширине этой щели в электронвольтах, а также значения минимума зоны проводимости и максимума валентной зоны. В случае обработки спин-поляризованных расчетов, что необходимо для описания систем с магнитным упорядочением, анализ проводится для каждого спинового канала отдельно, а вывод результатов совмещен.

Основываясь на результатах анализа положения экстремумов энергетических зон и уровня Ферми, можно смещать энергетический спектр на произвольную величину, что необходимо для совмещения максимума (потолка) валентной зоны с нулевым уровнем – часто используемого в научных публикациях варианта визуализации зонной структуры материалов. Такое смещение используется и для построения зонных диаграмм гетеропереходов. В целом при построении зонной структуры наиболее часто анализируется и визуализируется та часть энергетического спектра, которая расположена вблизи уровня Ферми, поэтому более глубоко- и высоколежащие состояния могут быть отброшены при обработке «сырых» данных.

Анализатор позволяет осуществлять выбор зон, которые должны быть извлечены из файла с «сырыми» данными, смещены по энергии при необходимости, конвертированы и записаны в выходной файл. Также проводится анализ ширины зон, а результат записывается в отдельный выходной файл, что позволяет быстро оценить дисперсию зон и определить индексы зон вблизи уровня Ферми или пересекающих его. Все возможности реализуются в режиме «по требованию» и совмещаются между собой без логических противоречий. В случае задания некорректных параметров в программе выводится сообщение об ошибке, и работа анализатора завершается. Для Linux-версии анализатора оставлена поддержка Gnuplot, что позволяет сразу визуализировать обработанные данные для первичной оценки. В процессе исследований авторы статьи усовершенствовали работу этой части программы в сравнении с bandgnu13 таким образом, чтобы исследователь в два клика мышью мог визуализировать полученный результат без дополнительных действий по коррекции входного файла для Gnuplot, генерируемого анализатором по запросу.

Автоматизация сборки осуществляется с помощью переносимого диалекта makefile, поддерживаемого утилитами make и nmake под Linux и Windows соответственно. Сборка может быть осуществлена любым компилятором с поддержкой стандарта C++11. Работоспособность и тестирование под Linux проводились с использованием C++-компиляторов GCC, LLVM и Intel, под Windows – с использованием MSVC (версия Community Edition).

Применение разработанного анализатора: описание и примеры

Запуск анализатора осуществляется в терминале (командной строке) стандартным образом: `PROGNAME <PARAMS AND OPTIONS> FILE`. Здесь PROGNAME имя программы, PARAMS AND OPTIONS – параметры и их опции, FILE – файл с «сырыми» данными, генерируемый пакетом OpenMX. По умолчанию этот файл имеет расширение Band, например, TEST.Band. Программа устроена таким образом, что достаточно передать ей только TEST (так называемый seedname) или TEST. (с точкой в конце), остальная часть будет дополнена автоматически. Полное имя также поддерживается, но его разумнее задавать, когда оно отлично от стандартного, например, TEST-strong-pressure_01.bs, что может быть востребовано при пакетной обработке большого количества зонных расчетов. В текущей версии анализатора 0.3.4 доступны следующие параметры:

- h – выводит информацию о помощи по использованию программы;
- v – выводит информацию о версии программы;
- i – проводит анализ запрошенного файла и выдает результат в эмулятор терминала;
- w – проводит анализ зон и записывает индекс зоны, ее максимум, минимум и ширину в файл seedname-BS-WIDTH.out;
- t – выводит информацию о времени, затраченном на чтение, запись файлов, а также полное время с учетом анализа;
- g – создает файлы, необходимые для работы пакета визуализации Gnuplot;
- s – задает смещение в электронвольтах для зон;
- b – выбирает зоны с запрошенными индексами для анализа и обработки с последующей записью в выходные файлы;
- vbm – выводит значение максимума валентной зоны с повышенной точностью.

Запуск программы без параметров конвертирует все зоны из исходного файла и записывает их в выходной файл без дополнительных уведомлений. На рис. 1 представлен пример анализа файла Diamond.Band. Показано, что всего в расчете участвовало 26 зон, первые четыре из которых являются валентными. Ширина энергетической щели (запрещенной зоны) составляет 4,229 эВ, что совпадает с опубликованными расчетными данными при сравнимом уровне теории. На основе анализа осуществляется выбор первых восьми энергетических зон, смещен-

ных на величину энергии, равную разнице между энергией Ферми и максимумом верхней валентной зоны, с записью файла, содержащего информацию о минимуме, максимуме и ширине выбранных зон, с выводом затраченного времени чтение/запись. Полученные данные визуализированы в пакете MS Excel.

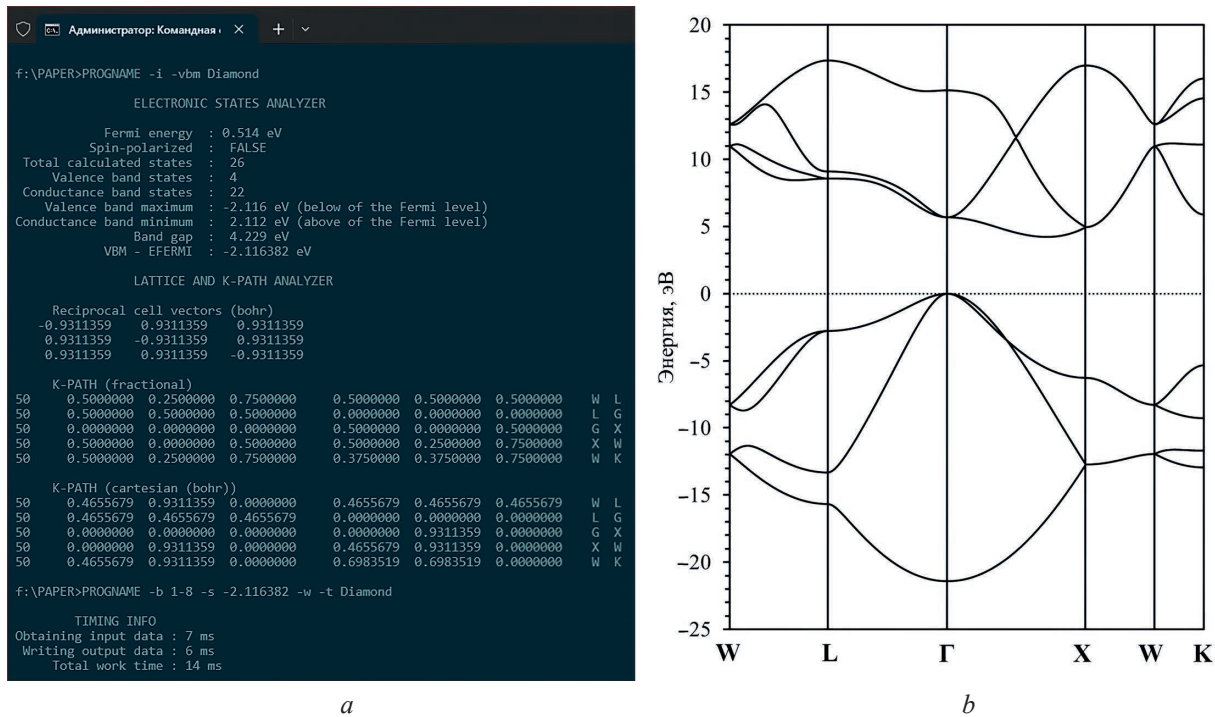


Рис. 1. Результат работы анализатора в операционной системе Windows на тестовой задаче:

a – анализ данных для полупроводника (алмаз) в не спин-поляризованном случае;

b – визуализация обработанных данных из выходного файла в MS Excel

Fig. 1. Result of analyzer work on the test task under OS Windows:

a – data analysis for semiconductor (diamond) in no spin-polarized case;

b – visualization of processed data from output file in MS Excel

Выходные текстовые файлы Diamond-BS.out и Diamond-BS-WIDTH.out содержат информацию о зонной структуре и ширине зон соответственно. Структура данных файла Diamond-BS.out представлена на рис. 2.

Diamond-BS.out			
	DISTANCE	ENERGY	BAND
1	0.000000	-11.94309	1
2	0.013437	-12.06064	1
3	0.026874	-12.18164	1
4	0.040311	-12.30496	1
5	0.053748	-12.42968	1
6	0.067185	-12.55503	1
7	0.080622	-12.68039	1
8	0.094059	-12.80526	1

a

Diamond-BS-WIDTH.out				
	BAND	MIN	MAX	WIDTH
1	1	-21.42469	-11.94309	9.481601
2	2	-13.32244	-0.001497	13.32094
3	3	-9.276030	-0.000000	9.276030
4	4	-8.283623	0.000000	8.283623
5	5	4.228833	10.97082	6.741984
6	6	4.962560	11.53899	6.576429
7	7	5.692181	17.00297	11.31079
8	8	11.76239	17.37849	5.616100

b

a

b

Рис. 2. Структура выходных файлов анализатора: *a* – файл Diamond-BS.out, содержащий информацию о зонной структуре; *b* – файл Diamond-BS-WIDTH.out, содержащий информацию о ширине зон

Fig. 2. Structure of the analyzer output files: *a* – the Diamond-BS.out file containing information about band structure; *b* – the Diamond-BS-WIDTH.out file containing information about width of bands

Первая строка представляет собой заголовки столбцов. Столбец DISTANCE содержит информацию о расстоянии между *k*-точками в обратной решетке в атомных единицах, как это принято в подавляющем большинстве пакетов численного моделирования. Столбец ENERGY содержит значение энергии *k*-точки в электронвольтах, более удобных для представления, чем атомные

единицы (Хартри). Столбец BAND содержит индекс зоны, к которой относятся данные столбцов DISTANCE и ENERGY. Эта информация является вспомогательной и служит для ориентирования при просмотре данных в текстовом редакторе и может быть удалена после импорта в пакет для визуализации. В структуре данных файла Diamond-BS-WIDTH.out присутствуют сведения о ширине зон: столбец BAND аналогично предыдущему указывает на индекс зоны, а MIN, MAX и WIDTH – на минимум, максимум и ширину этой зоны. В случае спин-поляризованных расчетов схема остается такой же с добавлением соответствующих столбцов/строк для различных спиновых состояний.

Размер исполняемого файла составляет 74 Кбайт для Windows и 63 Кбайт для Linux. Потребление ресурсов зависит от размера анализируемого файла и составляет обычно менее 1 Мбайта оперативной памяти. Типичное время работы анализатора – десятки миллисекунд. Исходный код компактен и содержит менее 900 строк. Для работы кода нужны библиотеки, присутствующие в любой операционной системе, а именно – стандартная библиотека и рантайм C++. В перспективе рассматриваются расширение возможностей для анализа и внедрение нового функционала. Используемая архитектура программы позволяет обеспечить поддержку анализа данных и для других пакетов.

Анализ производительности

Понимание производительности того или иного программного решения – важный аспект компьютерных наук. Обычно такой анализ проводят с использованием специализированных инструментов для профилирования и трассировки, например, Perforator или утилит для BPF с последующим построением флеймграфов. Однако с практической точки зрения для исследователя-физика наиболее важен один параметр – время работы программы. Разработанный анализатор имеет встроенную возможность замеров времени на операции чтения и записи, использующую стандартную для языка C++ библиотеку chrono. По причине отсутствия другого ПО, сравнить разработанное решение представляется возможным лишь с упомянутым ранее штатным решением для OpenMX bandgnu13. Так как последнее не имеет встроенной возможности замеров времени, был модифицирован его код таким образом, чтобы получить эту информацию.

Поскольку bandgnu13 может только конвертировать данные, оценим лишь скорость чтения и записи для обеих программ. Как ранее было сказано, bandgnu13 может быть скомпилирована только под операционную систему Linux, поэтому в качестве тестовой системы использовался типовой ПК на основе Core i3-6100, 8 Гб оперативной памяти DDR4-2133 в одноканальном режиме; использовалась операционная система Ubuntu, установленная в WSL2, размещаемая на HDD. Следует отметить, что в таком варианте тестирования эффективность работы анализатора ниже из-за накладных расходов системы виртуализации и замедления работы с файловой системой накопителя. В качестве теста был использован специально подготовленный файл, включающий 420 000 k -точек, распределенных по 2100 зонам. Заметим, что обычно на практике решаемые задачи на один-два порядка меньше (рис. 1). Все зоны анализировались на положение минимума, максимума и значение ширины, затем конвертировались и записывались в выходной файл, дополнительно создавался файл для Gnuplot. Затем созданные файлы удалялись, а операции анализа и записи результатов повторялись согласно заданному количеству циклов, что в рассматриваемом случае составляло 100 раз. Результаты тестирования программ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Тестирование производительности программ через временные затраты на чтение и запись
Table 1. Testing the performance of programs through the time spent on reading and writing

Тестирование	Анализатор	Bandgnu13
Чтение, мс	178,30 ± 11,63	102,51 ± 3,03
Запись, мс	345,10 ± 16,92	314,33 ± 5,97
Общее время, мс	523,99 ± 22,75	416,86 ± 6,77

Согласно табл. 1, разработанный анализатор на операции чтения медленнее bandgnu13, тогда как операция записи осуществляется на близкой скорости и занимает в 2–3 раза больше времени, чем чтение, что приводит к тому, что общее время работы анализатора примерно на 25 % больше,

чем у bandgnu13. Наблюдаемое поведение обусловлено различной логикой работы программ: разработанный анализатор опирается на структуры объектно-ориентированного программирования, в то время как bandgnu13, написанная на С, не использует их. Также следует учитывать различия в размере блоков чтения и традиционную «медлительность» fstream, через потоки которого осуществляются чтение и запись. Однако, учитывая функциональные возможности и различия в целях и задачах данных программ, а также временные интервалы, не превышающие одной секунды даже для массивных задач, сравнительно редко встречающихся, производительность анализатора можно считать высокой и соизмеримой с программой сравнения.

Заключение

1. Кратко рассмотрены основные принципы работы научного программного обеспечения для исследования материалов методами численного квантово-механического моделирования. Отмечены особенности, присущие преимущественно коммерческому программному обеспечению, позволяющие обеспечивать эффективную обработку вычислений с последующей визуализацией. Показано, что программа bandgnu13, входящая в пакет численного квантово-механического моделирования OpenMX, фактически является простым конвертером выходных данных о зонной структуре, представленных в «сыром» виде в формат данных, пригодным для дальнейшей визуализации. Изложены требования к функциональности анализатора, который по запросу пользователя будет считывать «сырые» данные, анализировать их, обрабатывать и сохранять в удобном для последующей визуализации формате.

2. На основании рассмотренных требований реализовано кросс-платформенное CLI-приложение, написанное на языке C++. Благодаря использованию стандартной библиотеки шаблонов анализатор представляет собой компактное (размер исполняемого файла менее 100 Кбайт) монолитное решение без дополнительных библиотечных зависимостей. Проведена оценка производительности анализатора в сравнении с программой bandgnu13, показавшая, что разработанный анализатор лишь незначительно медленнее на больших данных, что связано с общей «медлительностью» файловых потоков, через которые осуществляются чтение/запись, при этом практически в любом случае время работы анализатора будет составлять десятки миллисекунд.

3. Значительно переработана поддержка системы визуализации данных Gnuplot, что дает возможность в два клика мышью визуализировать обработанные результаты расчетов. Описанный принцип работы предлагаемой программы позволит использовать данную статью как краткое руководство пользователя. Архитектура анализатора расширяет его функциональность и добавляет поддержку форматов других пакетов для квантово-механического моделирования, в первую очередь CASTEP и VASP. Также в дальнейшем планируется внедрение поддержки Matplotlib для быстрой кросс-платформенной визуализации за счет данной библиотеки.

4. Исследования поддержаны Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проект T23УЗБ-111), выполнены в рамках заданий 2.14.3 (№ госрегистрации 20212445) и 2.25 (№ госрегистрации 20240603) Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы.

Список литературы

1. Quantum ESPRESSO: A Modular and Open-Source Software Project for Quantum Simulations of Materials / P. Giannozzi [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. 2009. Vol. 21, No 39. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/39/395502>.
2. Kresse, G. Efficient Iterative Schemes for ab Initio Total-Energy Calculations Using a Plane-Wave Basis Set / G. Kresse, J. Furthmüller // Physical Review B. 1996. Vol. 54, No 16. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.11169>.
3. First Principles Methods Using CASTEP / S. J. Clark [et al.] // Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials. 2005. Vol. 220, No 5–6. P. 567–570. <https://doi.org/10.1524/zkri.220.5.567.65075>.
4. Chemistry with ADF / G. Te Velde [et al.] // Journal of Computational Chemistry. 2001. Vol. 22, No 9. P. 931–967. <https://doi.org/10.1002/jcc.1056>.
5. QuantumATK: An Integrated Platform of Electronic and Atomic-Scale Modelling Tools / S. Smidstrup [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. 2019. Vol. 32, No 1. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab4007>.

6. Computational Materials Engineering: Recent Applications of VASP in the MedeA® Software Environment / E. Wimmer [et al.] // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2016. Vol. 53, No 3. P. 263–272.
7. Ozaki, T. Variationally Optimized Atomic Orbitals for Large-Scale Electronic Structures / T. Ozaki // *Physical Review B*. 2003. Vol. 67. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.155108>.
8. Ozaki, T. Numerical Atomic Basis Orbitals from H to Kr / T. Ozaki, H. Kino // *Physical Review B*. 2004. Vol. 69. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.195113>.
9. Ozaki, T. Efficient Projector Expansion for the ab Initio LCAO Method / T. Ozaki, H. Kino // *Physical Review B*. 2005. Vol. 72. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.045121>.
10. Baglov, A. V. Atom Species Energy Dependence on Magnetic Configurations in the Perovskite Yttrium Orthoferrite / A. V. Baglov, L. S. Khoroshko // *Doklady BGUIR*. 2021. Vol. 19, No 8. P. 63–67. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-8-63-67>.
11. Baglov, A. V. Crystal Structure and Electronic Properties of Rhenium Disulfide / A. V. Baglov, L. S. Khoroshko // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2022. Vol. 89. P. 860–864. <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01438-x>.
12. Evolution of Structural and Electronic Properties Standardized Description in Rhenium Disulfide at the Bulk-Monolayer Transition / A. V. Baglov [et al.] // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28646>.
13. Electronic Structure of Bismuth Ferromanganite $\text{BiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ / A. V. Baglov [et al.] // *Semiconductors*. 2024. Vol. 58, No 13. P. 1054–1059. <https://doi.org/10.1134/S1063782624700040>.
14. Баглов, А. В. Исследование структурных и электронных свойств $\text{SmGaGe}_2\text{O}_7$ методами из первых принципов / А. В. Баглов, Л. С. Хорошко // *Неорганические материалы*. 2023. Т. 59, № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23010037>.
15. Бонч-Бруевич, В. Л. Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников; 2-е изд. перераб. и доп. М.: Изд-во Наука, 1990.
16. Yu, P. Y. *Fundamentals of Semiconductors. Physics and Materials Properties* / Y. P. Yu, M. Cardona; 4th Edition. Germany: Springer Ltd, 2010.
17. Raymond, E. S. *Basics of the Unix Philosophy. The Art of Unix Programming* / E. S. Raymond // Addison-Wesley Professional. 2004.

Поступила 31.03.2025

Принята в печать 28.06.2025

References

1. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N., Calandra M., Car R., Cavazzoni C., et al. (2009) Quantum ESPRESSO: A Modular and Open-Source Software Project for Quantum Simulations of Materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 21 (39). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/39/395502>.
2. Kresse G., Furthmüller J. (1996) Efficient Iterative Schemes for ab Initio Total-Energy Calculations Using a Plane-Wave Basis Set. *Physical Review B*. 54 (16). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.11169>.
3. Clark S. J., Segall M. D., Pickard C. J., Hasnip P. J., Probert M. I. J., Refson K., et al. (2005) First Principles Methods Using CASTEP. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*. 220 (5–6), 567–570. <https://doi.org/10.1524/zkri.220.5.567.65075>.
4. Te Velde G., Bickelhaupt F. M., Baerends E. J., Fonseca Guerra C., Van Gisbergen S. J. A., Snijders J. G., et al. (2001) Chemistry with ADF. *Journal of Computational Chemistry*. 22 (9), 931–967. <https://doi.org/10.1002/jcc.1056>.
5. Smidstrup S., Markussen T., Vancraeyveld P., Wellendorff J., Schneider J., Gunst T., et al. (2019) QuantumATK: An Integrated Platform of Electronic and Atomic-Scale Modelling Tools. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 32 (1). <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab4007>.
6. Wimmer E., Christensen M., Eyert V., Wolf W., Reith D., Rozanska X., et al. (2016) Computational Materials Engineering: Recent Applications of VASP in the MedeA® Software Environment. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 53 (3), 263–272. <https://doi.org/10.4191/kcers.2016.53.3.263>.
7. Ozaki T. (2003) Variationally Optimized Atomic Orbitals for Large-Scale Electronic Structures. *Physical Review B*. 67. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.155108>.
8. Ozaki T., Kino H. (2004) Numerical Atomic Basis Orbitals from H to Kr. *Physical Review B*. 69. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.195113>.
9. Ozaki T., Kino H. (2005) Efficient Projector Expansion for the ab Initio LCAO Method. *Physical Review B*. 72. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.045121>.
10. Baglov A. V., Khoroshko L. S. (2021) Atom Species Energy Dependence on Magnetic Configurations in the Perovskite Yttrium Orthoferrite. *Doklady BGUIR*. 19 (8), 63–67. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-8-63-67>.

11. Baglov A. V., Khoroshko L. S. (2022) Crystal Structure and Electronic Properties of Rhenium Disulfide. *Journal of Applied Spectroscopy*. 89, 860–864. <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01438-x>.
12. Baglov A., Khoroshko L., Zhoidzik A., Dong M., Weng Q., Kazi M. et al. (2024) Evolution of Structural and Electronic Properties Standardized Description in Rhenium Disulfide at the Bulk-Monolayer Transition. *Heliyon*. 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28646>.
13. Baglov A. V., Khoroshko L. S., Silibin M. V., Karpinsky D. V. (2024) Electronic Structure of Bismuth Ferromanganite $\text{BiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$. *Semiconductors*. 58 (13), 1054–1059. <https://doi.org/10.1134/S1063782624700040>.
14. Baglov A. V., Khoroshko L. S. (2023) Structural and Electronic Properties of $\text{SmGaGe}_2\text{O}_7$ Studied by First Principles Methods. *Inorganic Materials*. 59 (1), 1–7. <https://doi.org/10.1134/S002016852301003X> (in Russian).
15. Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G. (1990) *Physics of Semiconductors*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
16. Yu P. Y., Cardona M. (2010) *Fundamentals of Semiconductors. Physics and Materials Properties*. Germany, Springer Ltd Publ.
17. Raymond E. S. (2004) Basics of the Unix Philosophy. The Art of Unix Programming. *Addison-Wesley Professional*.

Received: 31 March 2025

Accepted: 28 June 2025

Вклад авторов

Баглов А. В. написал исходный код, провел отладку и тестирование разработанного программного обеспечения. Подготовил наборы входных и выходных тестовых файлов для тестирования программного обеспечения на пользовательских системах. Привел примеры использования программы. Сопровождал проект.

Хорошко Л. С. осуществила постановку задачи для разработки программного обеспечения, подготовила рукопись статьи, привела примеры и варианты использования программы, обеспечила первичное тестирование.

Authors' contribution

Baglov A. V. wrote the source code, debugged, and tested the developed software. Prepared sets of input and output test files for testing the software on user systems. Provided examples of program usage. Project maintainer.

Khoroshko L. S. formulated the problem for software development, prepared the article manuscript, provided examples and options for using the program, and provided initial testing.

Сведения об авторах

Баглов А. В., ст. науч. сотр. науч.-иссл. лаб. энергоэффективных материалов и технологий, Белорусский государственный университет; науч. сотр. Центра наноэлектроники и новых материалов, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Хорошко Л. С., канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр. науч.-иссл. лаб. энергоэффективных материалов и технологий, Белорусский государственный университет; вед. науч. сотр. Центра наноэлектроники и новых материалов, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
Минск, просп. Независимости, 4
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 17 293-53-55
E-mail: baglov@bsu.by
Баглов Алексей Викторович

Information about the authors

Baglov A. V., Senior Researcher at the Laboratory of Energy Efficient Materials and Technologies, Belarusian State University; Researcher at the Center of Nanoelectronics and Advanced Materials, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Khoroshko L. S., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Energy Efficient Materials and Technologies, Belarusian State University; Leading Researcher at the Center of Nanoelectronics and Advanced Materials, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 4
Belarusian State University
Tel.: +375 17 293-53-55
E-mail: baglov@bsu.by
Baglov Aleksey Viktorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-93-98>

УДК 004.89

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОМЕЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ STABLE DIFFUSION

К. И. УЛАСОВЕЦ, В. А. ЧУЙКО, Е. И. КОЗЛОВА

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. На современном рынке существует множество веб-сервисов, предназначенных для генерации изображений интерьеров с помощью методов генеративного дизайна. В то же время высокая стоимость и ограничения по использованию некоторых коммерческих решений ограничивают их доступность для широкого круга пользователей. В статье предложено экономически выгодное решение без значительных потерь в функциональности и качестве. Представлены результаты разработки мобильного приложения для генерации изображений помещения (интерьеров) по фотографии и текстовому описанию пользователя. Для генерации изображений применена генеративно-сопоставительная нейронная сеть. Описан процесс преобразования текстового запроса в изображение. Приведены результаты тестирования приложения.

Ключевые слова: генерация изображений, диффузионная модель, латентная диффузия, зашумленные данные, сверточная нейронная сеть.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Уласовец, К. И. Мобильное приложение для генерации изображений помещения с использованием модели Stable Diffusion / К. И. Уласовец, В. А. Чуйко, Е. И. Козлова // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 93–98. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-93-98>.

MOBILE APPLICATION FOR GENERATING ROOM IMAGES USING STABLE DIFFUSION MODEL

KSENIYA I. ULASAVETS, VLADISLAV A. CHUYKO, ALENA I. KAZLOVA

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Numerous web services designed for generating interior images using generative design methods currently exist on the market. However, the high cost and limitations of some commercial solutions limit their accessibility to a wide range of users. This article proposes a cost-effective solution without significant sacrifices in functionality and quality. The article presents the results of developing a mobile application for generating images of rooms (interiors) based on a photograph and a user-supplied text description. A generative adversarial neural network was used to generate the images. The process of converting a text query into an image is described, and application testing results are provided.

Keywords: image generation, diffusion model, latent diffusion, noisy data, convolutional neural network.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Ulasavets K. I., Chuyko V. A., Kazlova A. I. (2025) Mobile Application for Generating Room Images Using Stable Diffusion Model. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 93–98. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-93-98> (in Russian).

Введение

Сегодня на рынке веб-сервисов, предназначенных для создания изображений интерьеров с помощью методов генеративного дизайна [1], предлагается широкий выбор вариантов как для пользователей-профессионалов, так и для любителей. В то же время высокая стоимость и лимиты по использованию некоторых коммерческих решений ограничивают их доступность для широкого круга пользователей.

Мобильное приложение для генерации изображений помещений (интерьеров) может предоставить пользователю интуитивно понятный инструмент визуализации помещения, а именно – сгенерированное изображение на основе фотографии и текстового запроса. В статье представлены результаты разработки и тестирования мобильного приложения для генерации изображений помещения. Требования к приложению: совместимость с различными мобильными устройствами, работающими на платформе Android, начиная с версии Android 7 (Nougat), соответствие функционала дизайна функционалу приложения.

При создании мобильного приложения использовался язык программирования Kotlin. Выбор обусловлен требованием к совместимости приложения с различными устройствами, наличием инструмента Multiplatform, системой типизации, позволяющей избегать ошибок, связанных с NullPointerException, возможностью функционального программирования. В качестве основной платформы, для которой разрабатывалось приложение, была выбрана Android, как доступная широкому кругу пользователей. Выбор минимальной версии Android – Android 7 API 24 – позволяет скачать и использовать данное приложение более 97 % пользователей Android [2].

Методы обработки и генерации изображений

Генерация изображений помещений производится на основе модели Stable Diffusion – генеративной нейронной сети с открытым исходным кодом, разработанной компанией Stability AI и представленной в публичный доступ в августе 2022 г. Модель предназначена для создания детализированных изображений на основе текстовых запросов. Stable Diffusion относится к классу моделей глубокого обучения, называемых диффузионными моделями. Диффузионные модели относятся к категории генеративных моделей, предназначенных для синтеза новых данных, обладающих сходными характеристиками с данными, использованными для обучения модели. В случае Stable Diffusion данными являются изображения.

Диффузионные нейросетевые модели работают на основе двух взаимобратных процессов – прямой и обратной диффузии. Процесс прямой диффузии представляет собой добавление шума к исходным данным на протяжении нескольких этапов. Конечная цель прямой диффузии – достижение состояния, в котором данные становятся полностью зашумленными и неразличимыми от чистого шума.

Процесс обратной диффузии является противоположным по отношению к процессу прямой диффузии. Обратная диффузия начинается с полностью зашумленных данных и заключается в пошаговом удалении шума с целью восстановления исходной структуры данных. Процесс предполагает наличие модели, обученной предсказывать шум, который необходимо удалить. Итог процесса обратной диффузии – получение данных, максимально приближенных к исходным. На рис. 1 представлен процесс прямой и обратной диффузии.



Рис. 1. Процесс прямой и обратной диффузии
Fig. 1. Forward and reverse diffusion process

Однако сами описанные выше процессы не формируют напрямую механизм стабильной диффузии, поскольку с точки зрения вычислительной эффективности скорость их работы в пространстве изображения значительно ниже, чем у классических алгоритмов машинного обучения. Модель стабильной диффузии применяется как раз для решения проблемы скорости.

Стабильная диффузия – это модель латентной диффузии, когда вместо работы в многомерном пространстве изображение сжимается в латентном (скрытом) пространстве, т. е. процессы прямой и обратной диффузии происходят в скрытом пространстве. Для изображения размером $3 \times 512 \times 512$ px скрытое пространство имеет размеры $4 \times 64 \times 64$ px, что в 48 раз меньше. Меньший размер пространства позволяет обрабатывать больше чисел, что обуславливает ускорение работы алгоритма на основе стабильной диффузии.

Архитектура модели стабильной диффузии состоит из двух компонент – модуля кодирования текста и модуля генерации изображения (рис. 2).

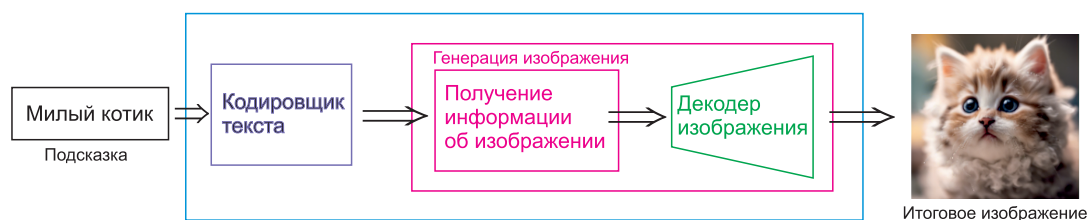


Рис. 2. Структура модели стабильной диффузии
Fig. 2. Structure of the stable diffusion model

Модуль кодирования текста используется для создания его векторных представлений, направляющих процесс генерации изображений. Вместо разработки нового кодировщика Stable Diffusion интегрирует предварительно обученную на парах «изображение–текст» модель CLIP (Contrastive Language-Image Pre-Training), способную использовать естественный язык для создания соответствующих векторных представлений текста [3].

Созданная пользователем текстовая подсказка (описание) сначала обрабатывается токенизатором, разделяющим текст на токены, представляющие собой слова или фразы, на которых токенизатор был предварительно обучен [4]. Затем токены проходят процессы создания взаимосвязей между словами и получения векторных представлений. Далее данные передаются в преобразователь текста, подготавливающий информацию для ввода шума в предсказатель [5].

Модуль генерации изображения включает в себя кодер и декодер. Кодер преобразует входное изображение в параметры распределения в скрытом пространстве, представляющие собой средние значения и стандартные отклонения для каждого измерения. Декодер затем использует эти параметры для генерации нового изображения, которое должно быть похоже на исходное [4].

В контексте диффузионных моделей процесс диффузии включает в себя постепенное добавление шума к данным и последующее его удаление. Этот процесс состоит из множества итераций, на каждой из которых применяется заранее предсказанный моделью шум.

Для успешного выполнения процесса обратной диффузии используется модель, например, сверточная нейронная сеть U-Net [6], предсказывающая разность между зашумленными данными и данными на предыдущем шаге диффузии, позволяя таким образом постепенно «очищать» данные от шума и восстанавливать изображение. Процесс преобразования текстового запроса в изображение в этом приложении включает следующие этапы:

- 1) текстовая подсказка и изображение в качестве входных данных [3];
- 2) кодирование входного изображения в скрытое пространство, текстовая подсказка делится на токены;
- 3) добавление гауссовского шума к скрытому представлению посредством прямой диффузии;
- 4) предсказатель шума U-Net принимает текстовую подсказку и зашумленное изображение и отнимает от него предсказанный шум в скрытом пространстве [7]. Этот процесс протекает столько раз, сколько шагов было указано при разработке алгоритма;
- 5) декодирование вариационным автокодировщиком скрытого представления в новое изображение, аналогично описанному в [6].

Проектирование интерфейса пользователя

Для выполнения поставленной задачи необходимо разработать графический интерфейс пользователя мобильного приложения. В качестве интерфейса выступают файлы, содержащие

XML-разметку, и классы представления. Интерфейс должен предоставлять пользователю возможность вводить текстовые запросы, просматривать разделы мобильного приложения, содержащие настройку для создания изображения, а также сохранять изображения в галерею.

При запуске приложения пользователь попадает на главную страницу. Раздел Img2Img – это раздел настроек генерации. Он содержит форму ввода данных для генерации изображения, которые будут отправлены на сервер. Детальные настройки генерации выставлены при разработке приложения, т. е. пользователю необходимо только ввести желаемый запрос в поле Prompt и нажать кнопку Generate. Форма для заполнения настроек генерации изображения представлена на рис. 3, а.

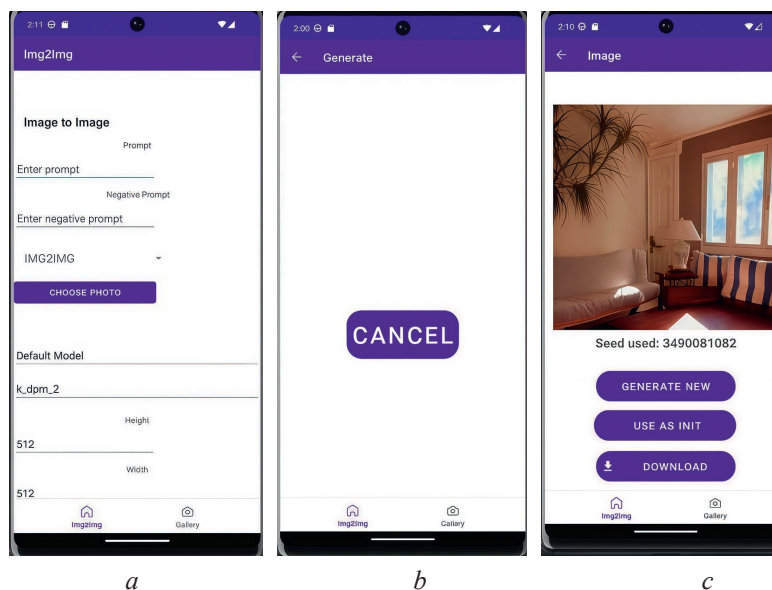


Рис. 3. Вид страниц приложения: а – главная страница Img2Img; б – страница «ожидания»; с – результат генерации

Fig. 3. The application pages: a – img2Img home page; b – “waiting” page; c – generation result

Работа приложения включает следующие этапы:

- ввод пользователем желаемого запроса в поле Prompt (например, interior design, 4K, high resolution, photorealistic, stylish modern style office, blue walls, white desks, laptop и т. д.);
- ввод в поле negative prompt – дополнение к запросу, уточняющее то, что пользователь не хочет видеть на картинке (например, window, door, low resolution, banner, logo, watermark, text, deformed, blurry, out of focus, surreal, ugly, beginner и т. д.);
- выбор на устройстве фотографии, на основе которой будет получено изображение интерьера;
- пользователь выбирает модель обработки изображения на основе его предварительного анализа (Default model, waifu_diffusion, Realistic Vision и т. д.);
- выбор пользователем:
 - метода обработки входного шума (k_dpm_2, k_dpm_adaptive, k_euler_a, lcm и т. д.);
 - размеров изображения (512×512 px, 512×768 px и т. д.);
 - количества шагов генерации (от 1 до 40);
 - seed (0 до 4294967295);
- в поле prompt strength пользователем вводится величина CFG Scale (принимает значения от 0 до 30) – это величина соответствия текстовому запросу. Чем больше значение, тем ближе результат к запрошенному, но вместе с тем и более зашумленный;
- в поле Image strength вводится значение от 0 до 1. Данная величина отвечает за то, насколько сгенерированное изображение похоже на исходное. Чем ближе величина к 1, тем меньше сгенерированное изображение будет походить на исходное;
- в поле AI API key вводится API-ключ, который пользователь получает по запросу на сайте Stable Horde.

После нажатия на кнопку Generate на сервер отправляются данные, необходимые для генерации изображений. Далее пользователь видит страницу «ожидание» (рис. 3, б), которую можно использовать для монетизации приложения, например, ввести в нее рекламу, пока сервер не закончит обрабатывать запрос. Эта страница не позволяет пользователю отправлять новые запросы

на сервер во время обработки предыдущего запроса. У пользователя есть возможность отменить запрос в случае необходимости.

После получения ответа от сервера пользователю виден результат генерации изображения, пример которого представлен на рис. 3, с. На данной странице у пользователя есть возможность:

- вернуться на начальную страницу для генерации нового изображения, нажав на кнопку Generate new;
- вернуться на главную страницу для генерации изображений и использовать полученное изображение в качестве входных данных, нажав на кнопку Use as init;
- скачать изображение на свое устройство, нажав на кнопку Download.

Пользователю в любой момент доступен раздел Gallery, представляющий собой галерею изображений. Также ему открыт доступ к просмотру ранее сгенерированных изображений. Каждому изображению и текстовой информации соответствует один блок. Пример страницы с галереей представлен на рис. 4.

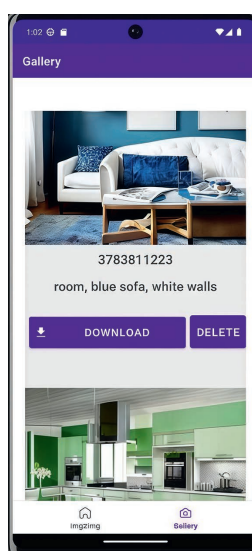


Рис. 4. Галерея изображений
Fig. 4. Image gallery

В каждом блоке пользователю доступны просмотр изображений, слайд и запроса к изображению, а также возможность скачать изображение на свое устройство, нажав кнопку Download, или удалить его из галереи с помощью кнопки Delete.

Заключение

1. Представлены этапы и результаты разработки мобильного приложения для генерации изображений помещений на основе модели Stable Diffusion. Приложение разработано на Kotlin для платформы Android, обеспечивает интуитивно понятный интерфейс и позволяет создавать интерьеры по текстовым запросам. Тестирование разработанного приложения показало успешную генерацию в популярных стилях (скандинавский, модерн), однако с артефактами при замене мелких деталей (ручки шкафов, узоры на текстиле).

2. Приложение можно использовать в качестве дополнительного помощника (вдохновителя/визуализатора), а также для генерации изображений для сцен виртуальной реальности. Приложение предназначено для работы на любом устройстве с системой Android (начиная с Android 7), время генерации изображения по запросу составляет от 20 с до 5 мин в зависимости от нагрузки на сервер Stable Horde, организованный как кооперативная платформа, где производительность системы напрямую зависит от количества активных участников.

Список литературы

1. Методы генеративного дизайна [Электронный ресурс] / А. Я. Пахтаева // Ноэма. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-generativnogo-dizayna>. Дата доступа: 12.06.2025.

2. Павленко, Е. Ю. Статический анализ безопасности Android-приложений / Е. Ю. Павленко, Г. Ю. Игнатъев, П. Д. Зегжда // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2017. № 4. С. 73–79.
3. Diffusion Models: A Comprehensive Survey of Methods and Applications / L. Yang [et al.] // ACM Computing Surveys (CSUR). 2023.
4. Ho, J. Classifier-Free Diffusion Guidance / J. Ho, T. Salimans // arXiv:2207.12598. 2022.
5. Deep Unsupervised Learning Using Nonequilibrium Thermodynamics / J. Sohl-Dickstein [et al.] // International Conference on Machine Learning. 2015.
6. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models / R. Rombach [et al.] // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022.
7. Weng, L. What are Diffusion Models? [Electronic Resource] / L. Weng. Mode of access: <https://lilianweng.github.io/posts/2021-07-11-diffusion-models/>. Date of access: 10.06.2025.

Поступила 19.06.2025

Принята в печать 23.09.2025

References

1. Pakhtaeva A. Ya. (2021) Generative Design Methods. *Nohma*. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-generativnogo-dizayna> (Accessed 12 June 2025) (in Russian).
2. Pavlenko E. Yu., Ignatiev G. Yu., Zegzhda P. D. (2017) Static Analysis of Android Application Security. *Information Security Issues. Computer Systems*. (4), 73–79 (in Russian).
3. Yang L., Zhang Z., Song Y., Hong Sh., Xu R., Zhao Y., et al. (2023) Diffusion Models: A Comprehensive Survey of Methods and Applications. *ACM Computing Surveys (CSUR)*.
4. Ho J., Salimans T. (2022) Classifier-Free Diffusion Guidance. *arXiv:2207.12598*.
5. Sohl-Dickstein J., Weiss E., Maheswaranathan N., Ganguli S. (2015) Deep Unsupervised Learning Using Nonequilibrium Thermodynamics. *International Conference on Machine Learning*.
6. Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., Esser P., Ommer B. (2022) High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Model. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
7. Weng L. (2022) *What are Diffusion Models?* Available: <https://lilianweng.github.io/posts/2021-07-11-diffusion-models/> (Accessed 10 June 2025).

Received: 19 June 2025

Accepted: 23 September 2025

Вклад авторов

Уласовец К. И. осуществила разработку приложения, подготовила рукопись статьи.
Чуйко В. А. разработал концепцию работы, провел критический анализ модели и текста статьи.
Козлова Е. И. выполнила критический анализ содержания статьи, подготовила окончательный ее вариант для публикации.

Authors' contribution

Ulasavets K. I. developed the application and prepared the manuscript of the article.
Chuyko V. A. developed the concept of the work, conducted a critical analysis of the model and text of the article.
Kazlova A. I. performed a critical analysis of the article's content and prepared its final version for publication.

Сведения об авторах

Уласовец К. И., студ., Белорусский государственный университет (БГУ)

Чуйко В. А., магистр физ.-мат. наук, ст. преп. каф. интеллектуальных систем, БГУ

Козлова Е. И., канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. интеллектуальных систем, БГУ

Information about the authors

Ulasavets K. I., Student, Belarusian State University (BSU)

Chuyko V. A., M. Sci. (Phys. and Math.), Senior Lecturer at the Department of Intelligent Systems, BSU

Kazlova A. I., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Department of Intelligent Systems, BSU

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 29 853-07-96
E-mail: Vchuyko@bsu.by
Чуйко Владислав Александрович

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 29 853-07-96
E-mail: Vchuyko@bsu.by
Chuyko Vladislav Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-99-104>

УДК 004.032.26

АДАПТАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА К НЕУСТОЙЧИВЫМ ВХОДНЫМ ДАННЫМ

В. В. МАЦКЕВИЧ, Ц. ГО

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Сегодня задачи классификации решаются, как правило, с применением нейронных сетей. В то же время при выборе архитектуры сети особое внимание уделяется сжимающим слоям, а архитектура многослойного персептрона выбирается интуитивно, хотя качество решения во многом зависит от вида разделяющей поверхности. В статье предлагается алгоритм проверки эффективности архитектуры многослойного персептрона на основе анализа свойств входных данных. Алгоритм основан на специальном, разработанном авторами, числовом показателе эффективности архитектуры нейронной сети – коэффициенте перекоса. Коэффициент рассчитывается на основе матрицы несоответствий, что не требует большого объема вычислений. Экспериментально показано, что выбор правильной архитектуры классификатора может повысить качество решения на 50 %.

Ключевые слова: нейронные сети, многослойный персептрон, архитектура, классификация, обучение, входные данные, сжатие, оптимизационная задача, пространство решений, метод отжига, метод градиентного спуска.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мацкевич, В. В. Адаптация нейросетевого классификатора к неустойчивым входным данным / В. В. Мацкевич, Ц. Го // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 99–104. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-99-104>.

NEURAL NETWORK CLASSIFIER ADAPTATION TO UNSTABLE INPUT DATA

VADIM V. MATSKEVICH, JIRAN GUO

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Today, classification problems are typically solved using neural networks. When choosing a network architecture, particular attention is paid to compression layers, while the multilayer perceptron architecture is chosen intuitively, although the quality of the solution largely depends on the type of separating surface. This article proposes an algorithm for testing the effectiveness of a multilayer perceptron architecture based on an analysis of input data properties. The algorithm is based on a special numerical metric for assessing the effectiveness of a neural network architecture, the skew coefficient, developed by the authors. The coefficient is calculated based on the confusion matrix, which does not require a large amount of calculations. Experiments have shown that choosing the right classifier architecture can improve solution quality by 50 %.

Keywords: neural networks, multilayer perceptron, architecture, classification, training, input data, compression, optimization problem, solution space, annealing method, gradient descent method.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Matskevich V. V., Guo J. (2025) Neural Network Classifier Adaptation to Unstable Input Data. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 99–104. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-99-104> (in Russian).

Введение

В настоящее время нейронные сети широко применяются для решения различных прикладных задач [1]. По мере роста мощностей вычислительных устройств расширяется класс решаемых задач, однако львиную их долю по-прежнему занимают задачи классификации. Несмотря на различие используемых для их решения архитектур сетей, в конце каждой из них расположен многослойный персептрон, который и выполняет роль классификатора [2, 3]. Его значимость на практике занижается, поскольку повышенное внимание при решении подобных задач уделяется проектировке архитектуры сжимающих слоев и организации процесса обучения громоздкой сети. Однако, как известно, архитектура нейронной сети, в том числе и классификатора, играет решающую роль в качестве конечного решения [4]. На практике же архитектуру многослойного персептрона выбирают интуитивно по размерам сжатых входных образов и количеству классов входных данных. При этом архитектура персептрона остается неизменной на протяжении всего решения задачи [5]. Однако входные данные большой размерности содержат множество различных мелких объектов, которые могут изменить свойства разделяющей поверхности классов [6], и, кроме того, – разнообразные шумы, способные сохраниться при сжатии, тем самым повышая требования к архитектуре классификатора.

В статье предлагается алгоритм проверки эффективности архитектуры нейросетевого классификатора на основе анализа свойств входных данных. Алгоритм не зависит от типа и размерности входных данных, а также инвариантен к количеству классов, архитектуре сжимающих слоев и алгоритмам предварительной обработки данных. При этом он не требует большого объема вычислений. Данные свойства алгоритма делают его универсальным для оценки архитектуры многослойного персептрона. Эффективность представленного в статье алгоритма проверена экспериментально на примере решения прикладной задачи.

Многомерная матрица несоответствий и пространство решений

Обучение нейронных сетей является задачей условной оптимизации, пространство решений которой обладает рядом особенностей:

- оптимальное решение в этом пространстве очень неустойчивое, иными словами, незначительное изменение значения любого из параметров нейронной сети приводит к совершенно иному результату;
- пространство имеет большую размерность, так как современные нейронные сети содержат большое количество настраиваемых параметров;
- пространство обладает свойством своеобразной неоднородности. Известно, что результатом работы сети является вектор значений нейронов выходного слоя. Для разных входных данных должны быть различные выходные значения. Учитывая специфику функционирования нейронной сети, можно показать, что оптимальные значения параметров будут находиться в достаточно узких диапазонах, а само оптимальное решение в силу особенности пространства – в некотором подпространстве малой мощности.

Входное значение в каждом нейроне – это сумма произведений весов и выходных значений предыдущего слоя. Поскольку веса при обработке данных зафиксированы, а входные данные имеют (если задачей не оговорено иное) многомерное равномерное распределение, каждое слагаемое является равномерно распределенной случайной величиной на некотором отрезке. По мере роста числа слагаемых (размерности входных данных) из закона больших чисел следует, что сумма сходится к нормальному распределению. А нормальное распределение, как известно, имеет маленькую дисперсию. Поэтому при разных значениях входных данных значения сумм будет трудно различить. Это приводит к необходимости использовать веса с большим соотношением. Из чего следует, что достаточно их расположить в узком интервале значений с нулем в центре. Как правило, при обучении нейронных сетей в задачах классификации точка оптимального решения является неустойчивой, поскольку в ее окрестности много точек с различными значениями целевой функции. Отсюда вывод – для любого параметра существует относительно небольшой отрезок значений, вероятность нахождения оптимального решения в котором существенно выше, чем на оставшемся диапазоне его изменений. Для формализации данного факта рассмотрим следующие определения.

Пространство решений множества Ω назовем неоднородным, если существует его разбиение на подмножества Ω_1, Ω_2 такие, что:

$$\begin{cases} \Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2, \Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset; \\ \forall \Omega_3, \Omega_4 : |\Omega_3| = |\Omega_4|, \Omega_3 \subseteq \Omega_1, \Omega_4 \subseteq \Omega_2; \\ P(x^* \in \Omega_3) >> P(x^* \in \Omega_4), \end{cases}$$

где x^* – оптимальное решение.

Отношение вероятности нахождения оптимального решения в некотором подмножестве множества Ω к мощности подмножества назовем плотностью этого подмножества.

Из введенных определений следует вполне очевидное утверждение, что если множество Ω обладает свойством неоднородности, то в нем существуют подмножества с заметно различающимися плотностями. То есть пространство решений Ω в задаче обучения нейронных сетей обладает свойством своеобразной неоднородности.

Замечание. Как было показано в [7], учет данного свойства позволяет существенно ускорить обучение нейронных сетей.

Теперь опишем пространство решений для задачи классификации. Пусть для ее решения используется нейросетевой классификатор, а именно – многослойный персептрон. Пусть в исходной задаче задано n классов входных данных. Классификацию будем производить стандартным образом: какой нейрон выходного слоя обладает наибольшим выходным значением, такому классу и принадлежит обрабатываемый объект.

Пусть задана квадратная матрица $n \times n$, где a_{ij} – количество раз, когда i -й класс был выбран j -м нейроном выходного слоя. Эта матрица также известна как многомерная матрица несоответствий [8]. Она применяется для оценки качества конечного решения. Сумма элементов главной диагонали определяют количество правильных ответов сети. Сумма всех остальных элементов матрицы определяет количество неверных классификаций. Данная матрица также показывает, для каких классов были допущены ошибки, сколько раз и какой нейрон сети был выбран сетью для конкретного класса ошибочно.

Воспользуемся данными свойствами матрицы и покажем, что ее можно использовать для численной оценки эффективности архитектуры нейронной сети. Сумма элементов одного столбца матрицы определяет количество «срабатываний» одного нейрона выходного слоя сети для различных входных данных. Воспользуемся последним фактом и на его основе построим алгоритм проверки эффективности архитектуры многослойного персептрона. Для этого введем следующее определение.

Определение. Коэффициентом перекоса q многомерной матрицы несоответствий A называется величина, определяющая отношение наибольшей суммы элементов столбца матрицы к сумме всех элементов:

$$q = \frac{\max_{j=1, n} \sum_{i=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}}. \quad (1)$$

Величина q для задачи из n классов может варьироваться от $1/n$ до 1. Чем меньше значение этого коэффициента, тем, очевидно, лучше архитектура нейронной сети. Значение $q = 1$ указывает на то, что нейронная сеть полностью «невосприимчива» к входным данным из различных классов.

Алгоритм проверки эффективности архитектуры многослойного персептрона

На основе многомерной матрицы несоответствий предлагается эвристический алгоритм проверки эффективности архитектуры, который представляет собой итерационный процесс с проверкой критерия оптимальности в конце каждой итерации.

Шаг 0. Определение архитектуры многослойного персептрона. На данном шаге, исходя из задачи, эксперт определяет количество слоев сети, количество нейронов в каждом из слоев и функ-

ции активации нейронов. Также устанавливается счетчик числа замеров t , который принимается равным нулю.

Шаг 1. Генерация начального приближения. Инициализируются параметры обучаемого многослойного персептрона. Например, веса сети могут задаваться реализациями равномерно распределенных случайных величин на отрезке с центром в нуле, а все остальные параметры зануляются.

Шаг 2. Построение многомерной матрицы несоответствий. Многослойный персептрон обрабатывает входные данные из обучающей выборки, а в матрицу записывается статистика откликов сети с учетом меток классов.

Шаг 3. Вычисление коэффициента перекоса q по формуле (1).

Шаг 4. Повторение оценки. Счетчик числа замеров увеличивается на единицу. Если счетчик равен T_2 – переход на шаг 5. В противном случае – переход на шаг 1.

Шаг 5. Проверка критерия оптимальности. Если среднее значение q меньше заданного порога T_1 , то алгоритм завершается, в противном случае – переход на шаг 0.

Замечание 1. Чем больше классов входных данных в задаче, тем ниже рекомендуется выставить значение параметра T_1 . Это можно объяснить тем, что вероятность «неудачной» генерации значений параметров при росте числа классов снижается. Рекомендуемое значение параметра для двух классов 0,9.

Замечание 2. Величину T_2 рекомендуется выставить 20. Большее значение T_2 существенно замедляет алгоритм, а меньшее приводит к большой погрешности оценки. «Неудачные» инициализации с большой долей вероятности указывают на проблемы с архитектурой сети.

Замечание 3. В случае использования большой обучающей выборки в целях экономии вычислительных ресурсов алгоритм допускает использование фрагмента обучающей выборки. Однако фрагмент должен содержать данные всех возможных классов для оценки эффективности архитектуры.

Методика проведения эксперимента

В рамках экспериментов рассмотрим прикладную задачу детектирования внепогодных изменений поверхности Земли по результатам анализа спутниковых снимков [9]. Разобьем спутниковые снимки на блоки 20×20 пикселей и решим задачу независимо для каждого блока. С учетом масштаба снимков блоки указанного размера вмещают наименьший возможный объект исследования. Для простоты будем решать данную задачу с использованием простого многослойного персептрона. Поскольку по условию задачи непогодные изменения определяются на основе пары снимков одной и той же местности в разные моменты времени, на вход нейронной сети поступают два цветных изображения разрешением 20×20 пикселей. Следовательно, входной слой будет содержать 2400 нейронов, а выходной – всегда два с функцией активации софтмакс (один нейрон указывает на наличие непогодных изменений, второй – на их отсутствие). Частично зафиксируем архитектуру, определив, что в обучаемой нейронной сети один скрытый слой.

Теперь начнем перебирать различные архитектуры многослойного персептрона и проверять их эффективность. Будем вычислять средний коэффициент перекоса для каждой архитектуры и обучать нейронные сети с различными значениями этого перекоса для всех рассматриваемых архитектур. В экспериментах проверялись различные виды ошибок, допущенных при проектировании архитектуры сети, и их влияние на конечный результат и коэффициент перекоса.

Количество нейронов в скрытом слое и их функция активации в экспериментах варьировались. Для оценки качества решения использовались относительные величины. За единицу брали нейронную сеть с наилучшей обобщающей способностью. Использовали алгоритм обучения на основе больцмановского отжига [7], реализованный в рамках программного комплекса для обучения глубоких нейронных сетей [10].

В целях экономии времени без существенной потери точности результатов количество итераций было ограничено величиной 0,5 млн. В данной задаче это никак не повлияло на качество решения, поскольку дальнейшие итерации не приводили к существенному улучшению решения. Результаты экспериментов и исследуемые архитектуры отображены в табл. 1.

Таблица 1. Оценка эффективности архитектуры нейронной сети
Table 1. Neural network architecture efficiency evaluation

Архитектура нейронной сети	Средний коэффициент перекоса	Качество конечного решения
16, биполярная сигмоидная	0,918	0,865
16, сигмоидная	0,906	0,867
16, ReLU	0,976	0,663
32, биполярная сигмоидная	0,886	0,897
32, сигмоидная	0,862	0,944
32, ReLU	0,920	0,795
64, биполярная сигмоидная	0,853	0,952
64, сигмоидная	0,785	1,000
64, ReLU	0,891	0,883
Источник: собственная разработка.		

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам экспериментов можно отметить, что чем меньше среднее значение коэффициента перекоса, тем выше эффективность архитектуры нейронной сети. Также из табл. 1 видно, что если среднее значение коэффициента перекоса превышает 0,9, то архитектура крайне неэффективна.

Данный алгоритм проверяет не только эффективность архитектуры нейронной сети, но и алгоритм генерации начального приближения в задаче обучения. Если обучение производилось с начального приближения, для которого $q = 1$ (т. е. располагалось за пределами области повышенной плотности), то качество решения уменьшалось более чем на 10 %. Если при проверке эффективности среднее значение коэффициента q для различных архитектур было близко или равно единице, то это означало, что начальные параметры нейронной сети задавались неверно. Отдельно стоит отметить что разница в качестве решения между наилучшей архитектурой и наихудшей превышает 50 %, что показывает, насколько важен выбор правильной архитектуры нейронной сети. Выбор эффективной архитектуры многослойного персептрона без его обучения позволяет не только повысить качество решения, но и существенно ускорить разработку систем на их основе, поскольку в этом случае экономится время, которое могло быть потрачено на обучение неэффективных архитектур.

Заключение

1. Проведены исследования пространства решения для оптимизационной задачи обучения нейронных сетей. Показано, что решение обладает свойством своеобразной неоднородности, т. е. существует область пространства малого размера, вероятность расположения оптимального решения в которой гораздо выше, чем в остальной части пространства.

2. Разработан алгоритм проверки эффективности архитектуры многослойного персептрона. Экспериментально установлено, что алгоритм позволяет проверить не только эффективность архитектуры нейронной сети, но и эффективность алгоритма генерации начального приближения.

3. С помощью предложенного алгоритма можно численно сравнивать эффективность архитектур с помощью усредненного значения коэффициента перекоса. Алгоритм не требует больших вычислительных ресурсов, что позволяет ускорить обучение нейронных сетей путем быстрого выбора эффективной архитектуры, а также повысить качество конечного решения и эффективность алгоритма генерации начального приближения.

Список литературы / References

1. Zhuang H., Lin Zh., Yang Y., Toh K.-A. (2025) An Analytic Formulation of Convolutional Neural Network Learning for Pattern Recognition. *Information Sciences. Elsevier*. 686. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.121317>.

2. Li Z., Yu Y., Yin Ch., Shi Y. (2025) AdaNet: A Competitive Adaptive Convolutional Neural Network for Spectral Information Identification. *Pattern Recognition. Elsevier*. 163. <https://doi.org/10.1016/j.pat-cog.2025.111472>.
3. Talebzadeh H., Talebzadeh M., Satarpour M., Jalali F., Farhadi B., Vahdatpour M. S. (2024) Enhancing Breast Cancer Diagnosis Accuracy Through Genetic Algorithm-Optimized Multilayer Perceptron. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 7 (4), 4433–4449. <https://doi.org/10.1007/s41939-024-00487-3>.
4. Gao Y., Hu Z., Chen W. A., Liu M., Ruan Y. (2025) A Revolutionary Neural Network Architecture with Interpretability and Flexibility Based on Kolmogorov-Arnold for Solar Radiation and Temperature Forecasting. *Applied Energy. Elsevier*. 378 (A). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124844>.
5. Du J., Zeng J., Chen Ch., Ni M., Guo Ch., Zhang Sh., et al. (2025) Acoustic Emission Monitoring for Damage Diagnosis in Composite Laminates Based on Deep Learning with Attention Mechanism. *Mechanical Systems and Signal Processing. Elsevier*. 222. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111770>.
6. Altalhan M., Algarni A., Alouane M. T. H. (2025) Imbalanced Data Problem in Machine Learning: A Review. *IEEE Access*. 13, 13686–13699. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3531662>.
7. Krasnoprosin V. V., Matskevich V. V. (2024) Random Search in Neural Networks Training. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 34 (2), 309–316. <http://dx.doi.org/10.1134/S105466182470010X>.
8. Heydarian M., Doyle T. E., Samavi R. (2022) MLCM: Multi-Label Confusion Matrix. *IEEE Access*. 10, 19083–19095. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151048>.
9. Zhou X., Bu Q., Matskevich V., Nedzved A. (2024) Landscape's Non-Natural Changes Detection System by Satellites Images Based on Local Areas. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 34 (2), 365–378. <http://dx.doi.org/10.1134/S1054661824700159>.
10. Krasnoprosin V. V., Matskevich V. V. (2023) Neural Network Software Technology Trainable on the Random Search Principles. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems, Research Papers Collection*. 7, 133–140.

Поступила 31.03.2025

Received: 31 March 2025

Принята в печать 27.06.2025

Accepted: 27 June 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Мацкевич В. В., канд. техн. наук, доц. каф. информационных систем управления, Белорусский государственный университет

Го Цзижань, асп. каф. информационных систем управления, Белорусский государственный университет

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
Минск, просп. Независимости, 4
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 29 125-49-07
E-mail: matskevich1997@gmail.com
Мацкевич Вадим Владимирович

Information about the authors

Matskevich V. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor at Information Management Systems Department, Belarusian State University

Guo J., Postgraduate at Information Management Systems Department, Belarusian State University

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 4
Belarusian State University
Тел.: +375 29 125-49-07
E-mail: matskevich1997@gmail.com
Matskevich Vadim Vladimirovich