



DOI: 10.32603/1993-8985

ISSN 1993-8985 (print)  
ISSN 2658-4794 (online)

*Известия высших учебных заведений России*

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**

**Том 27 № 6 2024**



*Journal of the Russian Universities*

**RADIOELECTRONICS**

**Vol. 27 No. 6 2024**

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2024

Saint Petersburg  
ETU Publishing house

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ № ФС77-74297 от 09.11.2018 г.).

Индекс по каталогу АО «Почта России» П4296

**Учредитель и издатель:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») Журнал основан в 1998 г.

Издается 6 раз в год.

Включен в RSCI на платформе Web of Science, Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine,

Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ); соответствует декларации Budapest Open Access Initiative, является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Crossref.

**Редакция журнала:**

197022, Санкт-Петербург,

ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

**RE.ELTECH.RU**

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**А. В. СОЛОМОНОВ**, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

### ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

**В. М. КУТУЗОВ**, д.т.н., президент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Dieter H. BIMBERG**, PhD, Dr Phil. Nat. Dr H. C. Mult., исполн. директор "Bimberg Center of Green Photonics", Чанчуньский институт оптики, точной механики и физики КАН, Чанчунь, Китай

**Matthias A. HEIN**, PhD, Dr Rer. Nat. Habil., Prof.,

Технический университет, Ильменау, Германия

**Jochen HORSTMANN**, PhD, Dr Rer. Nat., директор департамента, Гельмгольц-центр, Гестахт, Германия

**Erkki LANDERANTA**, PhD, Prof., Технический университет, Лаппеенранта, Финляндия

**Ferran MARTIN**, PhD (Phys.), Prof., Автономный университет, Барселона, Испания

**Piotr SAMCZYNSKI**, PhD, Dr Sci., Associate Prof.,

Варшавский технологический университет,

Институт электронных систем, Варшава, Польша

**Thomas SEEGER**, Dr Sci. (Eng.), Prof., Университет Зигена, Зиген, Германия

**А. Г. ВОСТРЕЦОВ**, д.т.н., проф., Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**С. Т. КНЯЗЕВ**, д.т.н., доц., Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

**А. Н. ЛЕУХИН**, д.ф.-м.н., проф., Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола, Россия

**С. Б. МАКАРОВ**, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург, Россия

**Л. А. МЕЛЬНИКОВ**, д.ф.-м.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

**А. А. МОНАКОВ**, д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), С.-Петербург, Россия

**А. А. ПОТАПОВ**, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

**Н. М. РЫСКИН**, д.ф.-м.н., гл.н.с., Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов, Россия

**С. В. СЕЛИЩЕВ**, д.ф.-м.н., проф., НИУ "Московский институт электронной техники", Москва, Россия

**А. Л. ТОЛСТИХИНА**, д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва, Россия

**А. Б. УСТИНОВ**, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

**В. А. ЦАРЕВ**, д.т.н., проф., Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

**Н. К. ЮРКОВ**, д.т.н., проф., Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

**Ю. В. ЮХАНОВ**, д.т.н., проф., Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

### ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

**С. Е. ГАВРИЛОВ**, к.т.н., доц., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия

**Цель журнала** – освещение актуальных проблем, результатов прикладных и фундаментальных исследований, определяющих направление и развитие научных исследований в области радиоэлектроники

### Журнал выполняет следующие задачи:

- предоставлять авторам возможность публиковать результаты своих исследований;
- расширять сферу профессионального диалога российских и зарубежных исследователей;
- способствовать становлению лидирующих мировых

позиций ученых России в области теории и практики радиоэлектроники;

- знакомить читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок;
- привлекать перспективных молодых специалистов к научной работе в сфере радиоэлектроники;
- информировать читателей о проведении симпозиумов, конференций и семинаров в области радиоэлектроники



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0



# ***JOURNAL OF THE RUSSIAN UNIVERSITIES. RADIOELECTRONICS*** ***IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII ROSSII. RADIOELEKTRONIKA***

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (PI № FS77-74297 from 09.11.2018).  
Subscription index in JSC "Post of Russia" catalogue is П4296  
**Founder and publisher:** Saint Petersburg Electrotechnical University (ETU)  
Founded in 1998. Issued 6 times a year.  
The journal is included in RSCI (Web of Science platform), Ulrichsweb Global Serials Director, Bielefeld Academic Search Engine, Google Scholar, Library of Congress, Research4life, ResearchBib, WorldCat, The Lens, OpenAIRE.

The journal is indexed and archived in the Russian science citation index (RSCI).  
The journal complies with the Budapest Open Access Initiative Declaration, is a member of the Directory of Open Access Journals (DOAJ) and Crossref.  
**Editorial address:**  
ETU, 5F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
Tel.: +7 (812) 234-10-13  
E-mail: radioelectronic@yandex.ru **RE.ELTECH.RU**  
© ETU, design, 2020

## **EDITORIAL BOARD**

### **EDITOR-IN-CHIEF**

**Alexander V. SOLOMONOV**, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

### **CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD**

**Vladimir M. KUTUZOV**, Dr Sci. (Eng.), President, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

### **EDITORIAL BOARD:**

**Dieter H. BIMBERG**, PhD, Dr Phil. Nat. Dr H. c. mult., Executive Director of the "Bimberg Center of Green Photonics", Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics CAS, Changchun, China

**Matthias A. HEIN**, PhD, Dr Rer. Nat. Habil., Professor, Technical University, Ilmenau, Germany

**Jochen HORSTMANN**, PhD, Dr Rer. Nat., Head of the Department of Radar Hydrography, Institute for Coastal Research, Helmholtz Zentrum Geesthacht, Geesthacht, Germany

**Sergey T. KNYAZEV**, Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

**Erkki LAHDERANTA**, PhD, Professor, Technical University, Lappeenranta, Finland

**Anatolii N. LEUKHIN**, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

**Sergey B. MAKAROV**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Institute of Physics, Nanotechnology and Telecommunication St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

**Ferran MARTIN**, PhD (Phys.), Professor, Autonomous University, Barcelona, Spain

**Leonid A. MELNIKOV**, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

**Andrei A. MONAKOV**, Dr Sci. (Eng.), Professor, State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

**Alexander A. POTAPOV**, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS, Moscow, Russia

**Nikita M. RYSKIN**, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Saratov Branch, Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Saratov, Russia

**Piotr SAMCZYNSKI**, PhD, Dr Sci., Associate Professor, Warsaw University of Technology, Institute of Electronic Systems, Warsaw, Poland

**Thomas SEEGER**, Dr Sci. (Eng.), Professor, University of Siegen, Siegen, Germany

**Sergey V. SELISHCHEV**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia

**Alla L. TOLSTIKHINA**, Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Divisional Manager, Institute of Crystallography named after A. Shubnikov RAS, Moscow, Russia

**Vladislav A. TSAREV**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia

**Aleksey B. USTINOV**, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

**Aleksey G. VOSTRETSOV**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Yury V. YUKHANOV**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

**Nikolay K. YURKOV**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Penza State University, Penza, Russia

### **EXECUTIVE SECRETARY**

**Stanislav E. GAVRILOV**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

**The journal is aimed** at the publication of actual applied and fundamental research achievements in the field of radioelectronics.

### **Key Objectives:**

- provide researchers in the field of radioelectronics with the opportunity to promote their research results;
- expand the scope of professional dialogue between Russian and foreign researchers;
- promote the theoretical and practical achievements of Russian scientists in the field of radioelectronics at the international level;

- acquaint readers with international best practices in the implementation of scientific results;
- attract promising young specialists to scientific work in the field of radioelectronics;
- inform readers about symposia, conferences and seminars in the field of Radioelectronics



All the materials of the journal are available under a Creative Commons Attribution 4.0 License

## СОДЕРЖАНИЕ

### Научные статьи

#### ***Проектирование и технология радиоэлектронных средств***

**Мироненко И. Г., Соколов С. С., Шевченко М. Е., Севериков В. С., Фам Конг Че, Протченко А. И., Шарова Н. Н., Буровихин А. П., Иванов А. А.**

Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и емкости щелевого и плоскопараллельного конденсаторов с высокой температурной стабильностью характеристик на основе многослойной сегнетоэлектрической структуры.....6

#### ***Электродинамика, микроволновая техника, антенны***

**Бибарсов М. Р., Крячко А. Ф., Пшеничников А. В.** Оценка состояния функционирования фазированной антенной решетки при нарушении работоспособности фазовращателей антенных элементов.....20

#### ***Радиолокация и радионавигация***

**Кутузов В. М., Ипатов В. П., Соколов С. С.** Оценка энергетической скрытности РЛС с пространственно-временной модуляцией зондирующего сигнала.....30

**Нгуен Ван Туан, Кутузов В. М., Воробьев Е. Н.** Моделирование алгоритмов обработки в полуактивной радиолокационной системе с использованием сигнала 5G.....44

#### ***Микро- и нанoeлектроника***

**Халугарова К., Спивак Ю. М., Мошников В. А.** Особенности формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза.....55

**Щербаков А. Е.** Особенности радиопоглощения и экранирования электромагнитного излучения тканями, модифицированными полипирролом и магнетитом, в диапазоне частот от 3.9 до 8 ГГц.....68

#### ***Метрология и информационно-измерительные приборы и системы***

**Куракина Н. И., Мышко Р. А., Бурдин Р. А., Денисова Н. Ф.** Алгоритмическое обеспечение системы оценки воздействия дорожно-автомобильного комплекса на атмосферный воздух жилых территорий.....80

**Жданова Е. Н., Романцова Н. В.** Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при решении задач метрологического анализа.....95

#### ***Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий***

**Потапова Е. В.** Методы интраоперационной диагностики в пункционной малоинвазивной хирургии рака печени.....106

#### ***От редакции***

**Правила для авторов статей.....120**

## CONTENTS

### Original articles

#### ***Engineering Design and Technologies of Radio Electronic Facilities***

- Mironenko I. G., Sokolov S. S., Shevchenko M. E., Severikov V. S., Fam Kong Che, Protchenko A. I., Sharova N. N., Burovikhin A. P., Ivanov A. A.**  
Calculation of the Effective Dielectric Constant and Capacitance of Slit and Plane-Parallel Capacitors with High Temperature Stability Characteristics Based on a Multilayer Ferroelectric Structure.....6

#### ***Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas***

- Bibarsov M. R., Kryachko A. F., Pshenichnikov A. V.** Operation Evaluation of Phased Antenna Arrays in Case of Phase Shifter Malfunction.....20

#### ***Radar and Navigation***

- Kutuzov V. M., Ipatov V. P., Sokolov S. S.** Energy Stealth Evaluation of Radar Systems with a Space-Time Modulated Probing Signal.....30
- Nguyen Van Tuan, Kutuzov V. M., Vorobev E. N.**  
Signal Processing in Passive Radar Systems Using 5G: A Simulation Study.....44

#### ***Micro- and Nanoelectronics***

- Khalugarova K., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A.**  
Formation of Hierarchical Porous Nickel Oxide Nanoparticles by Green Synthesis.....55
- Scherbakov A. E.** Radio Absorption and Shielding of Electromagnetic Radiation by Polypyrrole- and Magnetite-Based Textiles in the 3.9...8 GHz Frequency Range.....68

#### ***Metrology, Information and Measuring Devices and Systems***

- Kurakina N. I., Myshko R. A., Burdin R. A., Denissova N. F.** Algorithmic Support for Environmental Impact Assessment of Road Transport Infrastructure on Atmospheric Air in Urban Areas.....80
- Zhdanova E. N., Romantsova N. V.** Mathematical Support and Software for Determining the Error in Solving Metrological Analysis Problems.....95

#### ***Medical Devices, Environment, Substances, Material and Product***

- Potapova E. V.**  
Methods of Intraoperative Diagnosis in Puncture Minimally Invasive Surgery of Liver Cancer.....106

#### ***From the Editor***

- Author's Guide**.....120

## Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и емкости щелевого и плоскопараллельного конденсаторов с высокой температурной стабильностью характеристик на основе многослойной сегнетоэлектрической структуры

И. Г. Мироненко<sup>1</sup>, С. С. Соколов<sup>1</sup>, М. Е. Шевченко<sup>1</sup>, В. С. Севериков<sup>1,2</sup>, Фам Конг Че<sup>1</sup>  
А. И. Протченко<sup>3</sup>, Н. Н. Шарова<sup>3</sup>, А. П. Буровихин<sup>1</sup>, А. А. Иванов<sup>1,2✉</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ОАО "Завод Магнетон", Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>АО «НИИ "Феррит-Домен"», Санкт-Петербург, Россия

✉ aai2@yandex.ru

### Аннотация

**Введение.** Создание современной электронной компонентной базы с улучшенными характеристиками возможно с применением новых материалов и технологий их изготовления. Поэтому важен вопрос анализа электрических параметров электронных компонентов, содержащих материалы, расширяющие их функциональные возможности. Стабилизация электрических свойств конденсаторов с переменной емкостью при изменении управляющего напряжения вследствие температурных воздействий является актуальной задачей. Решить ее можно используя совокупность нелинейных диэлектриков, свойства которых взаимно компенсируют нестабильность эффективной диэлектрической проницаемости емкости в широком интервале температур. К таким материалам относятся сегнетоэлектрики, обладающие спонтанной поляризацией, зависящей от температуры и стороннего электрического поля.

**Цель работы.** Создание расчетных моделей планарных щелевых и сэндвич-структур, содержащих многослойные пленки с изменяемыми по толщине стехиометрическими составами сегнетоэлектрических материалов. На основе таких структур можно спроектировать конденсаторы, емкость которых зависит от управляющего напряжения. Их можно использовать в качестве сосредоточенных элементов схем, работающих в диапазонах НЧ–СВЧ–длин волн и обладающих высокой температурной стабильностью.

**Материалы и методы.** Вычислительные математические модели для анализа слоистых структур созданы с помощью метода конформных отображений и использования граничных условий для касательных и нормальных компонент электрического поля.

**Результаты.** Выполнен анализ емкости щелевого и сэндвич (плоскопараллельного)-конденсаторов на многослойных структурах. Получены результаты расчета емкости конденсаторов в зависимости от количества сегнетоэлектрических слоев и их толщин с различными стехиометрическими составами, обеспечивающими требуемую стабильность в заданном интервале температур. Увеличение количества слоев в структуре с трех до пяти расширяет температурный диапазон стабилизации эффективной диэлектрической проницаемости емкости с ~50 °С до ~120...160 °С.

**Заключение.** Созданные математические модели позволили численно оценить температурную и полевую стабильность многослойных пленочных структур на основе бариево-стронциевых составов для применения их в качестве основы при построении компонентной базы с электрической перестройкой емкости.

**Ключевые слова:** слоистая структура, сегнетоэлектрические конденсаторные структуры, вариконды

**Для цитирования:** Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и емкости щелевого и плоскопараллельного конденсаторов с высокой температурной стабильностью характеристик на основе многослойной сегнетоэлектрической структуры / И. Г. Мироненко, С. С. Соколов, М. Е. Шевченко, В. С. Севериков, Фам Конг Че, А. И. Протченко, Н. Н. Шарова, А. П. Буровихин, А. А. Иванов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 6–19. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-6-19

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.10.2024; принята к публикации после рецензирования 18.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

## Calculation of the Effective Dielectric Constant and Capacitance of Slit and Plane-Parallel Capacitors with High Temperature Stability Characteristics Based on a Multilayer Ferroelectric Structure

Igor G. Mironenko<sup>1</sup>, Sergey S. Sokolov<sup>1</sup>, Maya E. Shevchenko<sup>1</sup>,  
Vasily S. Severikov<sup>1,2</sup>, Fam Kong Che<sup>1</sup>, Artemy I. Protchenko<sup>3</sup>,  
Natalia N. Sharova<sup>3</sup>, Anton P. Burovikhin<sup>1</sup>, Arkady A. Ivanov<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>JSC "Magnetron Plant", St Petersburg, Russia

<sup>3</sup>JSC Research Institute "Ferrite-Domain", St Petersburg, Russia

✉ aai2@yandex.ru

### Abstract

**Introduction.** The creation of a modern electronic component base with improved characteristics requires new materials produced using new manufacturing technologies. In this connection, it is important to analyze the electrical parameters of electronic components produced based on materials that extend their functionality. Therefore, stabilization of the electrical properties of capacitors with variable capacitance under changes in the control voltage due to temperature influences is a relevant research task. Its solution can be performed using a set of nonlinear dielectrics, the properties of which mutually compensate for the instability of capacitance over a wide temperature range.

**Aim.** Creation of computational models of planar slit structures containing multilayer films with thickness-variable stoichiometric compositions of ferroelectric materials. Such structures allow capacitors with the capacitance varying under the impact of control voltage to be designed. These structures can be used as concentrated circuit elements operated in the low-frequency–microwave-wavelength ranges and possessing high temperature stability.

**Materials and methods.** Computational mathematical models for the analysis of layered structures were developed using the method of conformal maps and using boundary conditions for tangential and normal components of the electric field.

**Results.** The capacitance of slit and plane-parallel capacitors on multilayer structures was analyzed. The capacitance of capacitors depending on the number of ferroelectric layers and their thicknesses with various stoichiometric compositions providing the required stability in a given temperature range was calculated. An increase in the number of layers in the structure from three to five extends the temperature range of stabilization of the effective dielectric constant of the capacitor from about 50 °C to about 120...160 °C.

**Conclusion.** The developed mathematical models were used to numerically evaluate the temperature and field stability of multilayer film structures based on barium strontium compositions for their use as a basis for constructing a component base with electrical capacity adjustment.

**Keywords:** layered structure, ferroelectric capacitor structures, variconds

**For citation:** Mironenko I. G., Sokolov S. S., Shevchenko M. E., Severikov V. S., Fam Kong Che, Protchenko A. I., Sharova N. N., Burovikhin A. P., Ivanov A. A. Calculation of the Effective Dielectric Constant and Capacitance of Slit and Plane-Parallel Capacitors with High Temperature Stability Characteristics Based on a Multilayer Ferroelectric Structure. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 6–19. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-6-19

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 15.10.2024; accepted 18.11.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Современные тенденции развития приборов и устройств, работающих в ВЧ–СВЧ-диапазонах, предъявляют новые требования к усовершенствованию пассивной электронной компонентной базы с электронным управлением их

электрическими параметрами. Такая электронная компонентная база создается из материалов, электрофизические характеристики которых (сопротивление, относительная магнитная и диэлектрическая проницаемости) изменяются под действи-

ем электрического тока, магнитного или электрического поля. Для построения электронной компонентной базы (ЭКБ), в частности конденсаторов переменной емкости, можно использовать нелинейные диэлектрики, обладающие спонтанной поляризацией. К таким материалам относятся перовскиты, сегнетоэлектрические материалы с кубической (псевдокубической) структурой  $A^2B^4O_3$ , титаната бария стронция  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BST) [1–11]. Такие материалы обладают высокой диэлектрической проницаемостью, которая изменяется под действием внешнего управляющего электрического поля. Однако недостатком элементной базы на основе перовскитов является зависимость их характеристик от температуры. Поэтому для температурной стабилизации ЭКБ (конденсаторов различного конструктивного исполнения) на основе сегнетоэлектриков можно использовать слоистые структуры, где каждый слой будет иметь свой температурный коэффициент диэлектрической проницаемости [1, 7]. Таким образом, можно создать слоистую диэлектрическую структуру с минимальной зависимостью электрических параметров конденсатора от температуры [10]. Слоистые диэлектрические структуры, созданные последовательностью слоев с различными диэлектрическими свойствами, можно оценить эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{эф}$ . Следует отметить, что пленки BST, входящие в слоистую структуру, должны иметь толщины примерно  $10^{-1}...10^{-2}$  мкм и разную концентрационную зависимость  $x$ . Таким образом, эффективная диэлектрическая проницаемость многослойной структуры определяется свойствами слоев.

**Постановка и решение задачи определения емкости планарного щелевого конденсатора.** Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от температуры и внешнего электрического поля для сегнетоэлектрических объемных материалов можно описать различными математическими моделями. В рассматриваемом случае для описания диэлектрических свойств BST использована модель Кюри–Вейса [1, 10], которая хорошо согласуется с экспериментальными зависимостями от температуры и содержания бария и

стронция. Выбранная модель зависимости  $\varepsilon(\eta, \xi)$  была подтверждена экспериментально [5–11]. Модель зависимости относительной диэлектрической проницаемости от содержания бария, внешнего электрического поля и температуры запишем в виде

$$\varepsilon(\eta, \xi) = \frac{\varepsilon_{00}(x)}{\left[ \left( \xi^2 + \eta^3 \right)^{\frac{1}{2}} + \xi \right]^{\frac{2}{3}} + \left[ \left( \xi^2 + \eta^3 \right)^{\frac{1}{2}} - \xi \right]^{\frac{2}{3}} - \eta}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{00}(x) = \frac{C(x)}{T_C(x)}$  – диэлектрическая воспри-

имчивость сегнетоэлектрика ( $C(x)$  – зависимость постоянной Кюри от содержания бария и стронция;  $T_C(x)$  – зависимость температуры Кюри сегнетоэлектрика состава  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  от содержания бария и стронция);  $x = (0, ...1)$  – массовая доля бария и стронция в составе твердого раствора  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ;  $\xi = \frac{E}{E_H}$  – безразмерный параметр ( $E$  – напряженность внешнего электрического поля;  $E_H$  – напряженность нормализованного поля:  $E_H = 19 + 1250x - 330x^2 -$

$- 220x^3$ );  $\eta(x) = \frac{\Theta_F}{4T_C(x)} \sqrt{1 + \left( \frac{4T}{\Theta_F} \right)^2} - 1$  – без-

размерный параметр, зависящий от содержания бария с учетом изменения внешней абсолютной температуры  $T$  ( $\Theta_F$  – температура Дебая, значение которой для рассматриваемого сегнетоэлектрического материала выбирается в пределах 170...180 К). Экспериментальные исследования объемных и толсто пленочных образцов состава  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  в зависимости от содержания бария и стронция в широком интервале температур позволили определить зависимости постоянной Кюри  $C(x)$  и температуры Кюри  $T_C(x)$  в виде  $C(x) = 0.78 + 0.76x$ ,  $T_C(x) = 42 + 439x - 96x^2$  [1–5]. Таким образом, на основании (1) можно построить зависимости диэлектрической проницаемости от темпе-

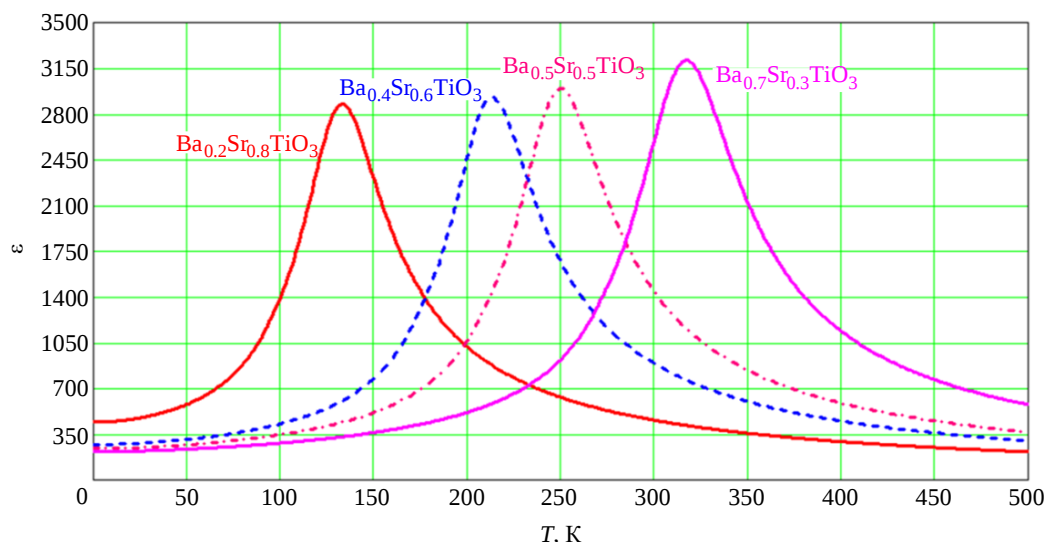


Рис. 1. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки (BST) от температуры при различной массовой доле бария и стронция ( $x = 0.2$ ;  $x = 0.4$ ;  $x = 0.5$ ;  $x = 0.7$ )

Fig. 1. The dependence of the relative permittivity of a ferroelectric film (BST) on temperature at different concentrations of barium and strontium ( $x = 0.2$ ;  $x = 0.4$ ;  $x = 0.5$ ;  $x = 0.7$ )

ратуры и внешнего управляющего поля сегнетоэлектрического слоя при различной массовой доле бария и стронция (рис. 1). Анализируя графики температурной зависимости  $\varepsilon(\eta, \xi)$  BST от значения  $x$  логично предположить, что можно создать многослойную структуру, в которой зависимость относительной диэлектрической проницаемости будет слабо изменяться в заданном интервале температур.

Найдем эффективную диэлектрическую проницаемость многослойной BST-структуры на основе расчета емкости щелевого планарного конденсатора.

Для этого воспользуемся методом конформных отображений. В основе расчета лежит инвариантность емкости к конформным отображениям, что позволяет свести исходную топологию электродов к конфигурации плоского конденсатора. При этом непроницаемые для поля границы диэлектрического слоя переходят в непроницаемые границы плоского конденсатора. Тем самым исключается краевой эффект, т. е. при конформных отображениях исходной конфигурации электродов и диэлектрических границ возникает конфигурация идеального плоского конденсатора. Очевидно, что проницаемая для поля граница "подложка-BST-структура" не может быть отображена без нарушения плоскопараллельности поля. Следовательно, применяя конформные отображения для расчета емкости в

неоднородной диэлектрической среде, можно рассчитывать только на приблизительные количественные оценки эффекта проникновения поля в подложку [12–15].

Поперечное сечение планарного щелевого конденсатора на многослойной BST-структуре, реализованного на диэлектрической подложке, изображено на рис. 2 (1 – металлические электроды; 2 – слоистая BST-структура суммарной толщиной  $d$  с эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и толщиной  $i$ -го слоя  $d_i$  с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_i$ ; 3 – диэлектрическая подложка с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ , толщиной  $d_{\text{подл}} = H - d = H - \sum_i d_i$ , где  $H$  – суммарная толщина структуры;  $s$  – ширина зазо-

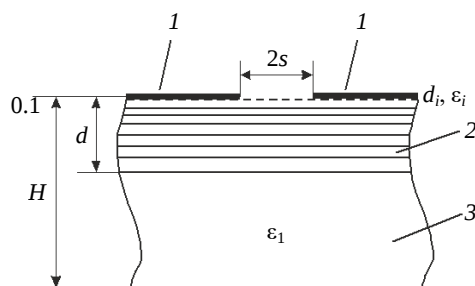


Рис. 2. Поперечное сечение планарного конденсатора на подложке с многослойной сегнетоэлектрической структурой

Fig. 2. Cross section of a planar capacitor on a substrate with a multilayer ferroelectric structure

ра. Из (1) видно, что  $\varepsilon_i$  – функция от  $T$  и массовой доли бария  $x_i$  состава  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ , т. е. имеем  $\varepsilon_i(x_i, T)$ .

Модель для расчета погонной емкости щелевого планарного конденсатора представим в виде структуры с бесконечными электродами и двумя магнитными стенками, расположенными на ширине зазора и на границе диэлектрической подложки (рис. 2), тем самым обеспечивая для касательных составляющих электрического поля режим холостого хода.

Часть щелевого планарного многослойного конденсатора показана на плоскости комплексной переменной  $z = x + jy$  (рис. 3, а) в виде четырехугольника, симметричного относительно мнимой оси  $jy$ . Используя конформное отображение [12–14], топологию щелевого конденсатора на плоскости  $z$  можно преобразовать к плоскости  $w = u + jv$ . На рис. 3, б показан плоскопараллельный конденсатор в плоскости комплексной переменной  $w$ , где  $A$  – область подложки;  $B$  – область слоистой структуры. Видно, что прямоугольники на рис. 3, а и б связаны между собой, т. е. внутренняя область одного прямоугольника (рис. 3, а) конформно отображена на внутреннюю область другого (рис. 3, б). Следовательно, емкости этих конденсаторов будут равны. Следуя методике, изложенной в [12–14], запишем отображение функции в виде интеграла Кристоффеля–Шварца:

$$w = F(t, k) = \int_0^t \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}}, \quad (2)$$

где  $F(t, k)$  – неполный эллиптический интеграл первого рода;  $k = e^{\frac{\pi s}{H}}$  – модуль эллиптического интеграла.

Значение комплексной переменной  $z$  позволяет определить верхнее значение предела интегрирования  $t$  в (2):

$$t = \frac{k - \operatorname{ch}\left(\frac{\pi z}{H}\right)}{k \operatorname{ch}\left(\frac{\pi z}{H}\right) - 1}. \quad (3)$$

Таким образом, на основании (2) и (3) получено конформное отображение одного прямоугольника (рис. 3, а) на другой (рис. 3, б). Границы прямоугольника на рис. 3, б (2, 6), (3, 5) и (2, 3), (6, 5) определяются значениями эллиптических интегралов в нормальной форме  $K(k)$ ,  $K'(k')$  [12–14], где  $K'(k')$  – интеграл от дополнительного модуля  $k' = \sqrt{1-k^2}$ . В плоскости  $w$  зададим границы: между подложкой и первым слоем BST-структуры уравнением  $z = x + jh$ ; между BST-слоями  $z = x + jd_i$ . Как видно из рис. 3, б, касательные составляющие электрического поля на границах диэлектрических слоев непрерывны, но при этом на всем протяжении границ существуют и нормальные составляющие электрического поля. Будем считать, что доминируют касательные составляющие поля при условиях, что  $s \ll H$ ,  $s \gg H$  и  $s \gg d_i$ . Из этого утверждения следует, что границы диэлектрических слоев будут параллельны линиям прямоугольника (2, 3) и (6, 5).

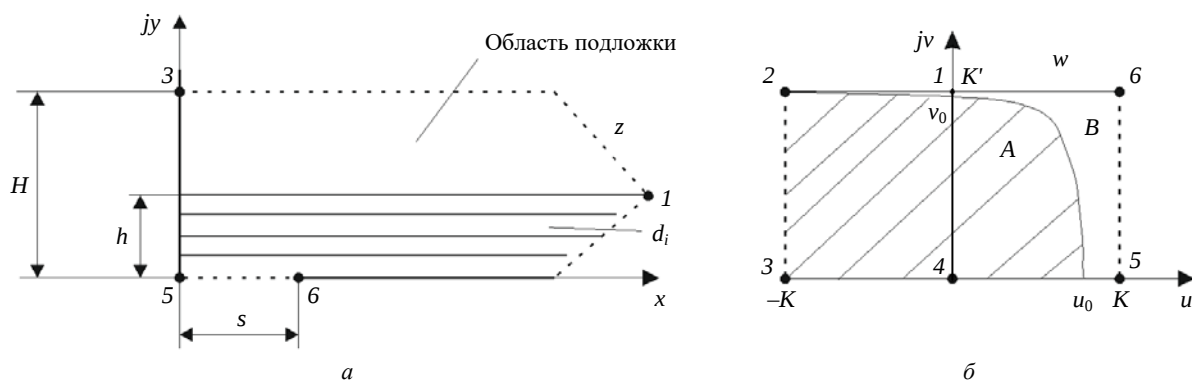


Рис. 3. Симметричная часть планарного конденсатора: а – в плоскости комплексной переменной  $z$ ; б – в плоскости комплексной переменной  $w$

Fig. 3. Symmetrical part of the cross section of a slit planar capacitor: а – in the  $z$  plane; б – in the complex plane  $w$

Определим вид границ на вещественной и мнимой осях (рис. 3, б). Граница на мнимой оси комплексной плоскости  $z = x + jh$  при  $x_0$ , отвечающая условию  $\text{Re}(t) = 0$ , есть  $jv_0$ . С учетом (3) найдем, что  $x_0$  удовлетворяет уравнению

$$\text{ch}\left(\frac{\pi x_0}{H}\right) = \frac{\cos\left(\frac{\pi h}{H}\right)}{k}.$$

Будем считать, что  $\cos\left(\frac{\pi h}{H}\right) \cong 1$  и  $e^{\frac{\pi s}{H}} \cong 1 - \frac{\pi s}{H}$ . Записав  $\text{ch}\left(\frac{\pi x_0}{H}\right) \approx 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\pi x_0}{H}\right)^2$ , найдем, что  $x_0 = \sqrt{\frac{2sH}{\pi}}$ . Таким образом, из (3) следует, что при  $x = x_0$  точное значение

$$\text{Im}(t_0) = j \frac{\text{sh}\left(\frac{\pi x_0}{H}\right)}{\sin\left(\frac{\pi h}{H}\right)}.$$

Подставив в это соотношение  $x_0 = \sqrt{\frac{2sH}{\pi}}$ , получим, что  $\text{Im}(t_0) \approx j \sqrt{\frac{2sH}{\pi h^2}}$ .

Найдем численную оценку этого выражения, задав геометрические размеры щелевого конденсатора:  $s \geq 10^{-2}$  мм;  $H = 1$  мм;  $h = 10^{-3}$  мм. Тогда  $\text{Im}(t_0) \approx j10^2$ . Затем получим  $v_0$  из эллиптического интеграла  $jv_0 = F(jt_0, k)$ , который при  $t \rightarrow \infty$  можно заменить на  $F(j\infty, k) = \frac{\pi}{2}$ .

Найденная численная оценка позволяет утверждать, что горизонтальная часть многослойной структуры практически параллельна верхнему электроду и совпадает с ним. Положение верхнего электрода определяется  $K' \approx \frac{\pi}{2}$  при  $k' \ll 1$ , по-

этому границы BST-слоев на оси  $jv$  близки к  $\frac{\pi}{2}$ .

Определим расположение точки  $z = jh$  на оси  $u$  (рис. 3, б). Из (3) следует, что значение верхнего предела интегрирования  $t_0$  в (2) равно:

$$t_0 = \frac{k - \cos\left(\frac{\pi h}{H}\right)}{k \cos\left(\frac{\pi h}{H}\right) - 1},$$

тогда  $u_0 = F(t_0, k)$ . Запишем соотношение для определения погонной емкости щелевого конденсатора с учетом влияния подложки в виде

$$C = \frac{\varepsilon_0}{\pi} [\varepsilon_1 (K + u_0) + \varepsilon_{\text{эф}} (K - u_0)], \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость подложки;  $\varepsilon_{\text{эф}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость многослойной структуры. Таким образом, из (4), зная геометрические размеры структуры, ее электрофизические параметры и значение емкости, получаемое из эксперимента, можно найти значение эффективной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\frac{\pi C}{\varepsilon_0} - \varepsilon_1 (K + u_0)}{K - u_0}. \quad (5)$$

Приближения, сделанные для получения формулы (5), обеспечивают малую погрешность оценки  $\varepsilon_{\text{эф}}$ . При этом нужно понимать, что  $t_0 \cong 1$ , необходимо точно вычислять  $u_0$ , которое близко к  $K$ .

Определим связь между  $\varepsilon_{\text{эф}}$  многослойной BST-структуры и параметрами  $\varepsilon_i$  и  $d_i$  слоев, входящих в нее. Обозначим  $d = d_1 + d_2 + \dots + d_n = \sum_i d_i$  – толщину сегнетоэлектрической структуры и положим  $H = d$ , исключив из анализа диэлектрическую подложку. Найдем емкость конденсатора, состоящего только из многослойной BST-структуры. Соотношения

(2) и (3) сохраняются с учетом, что  $k = e^{-\frac{\pi s}{d}}$ . Так как  $s/d > 1$  и  $k \rightarrow 0$ , значения эллиптических интегралов равны  $K = \frac{\pi}{2}$ , а  $K' = \ln \frac{4}{k} = 1.38 + \frac{\pi s}{d}$ .

Определим границы BST-слоев на плоскости  $w$ , заданных уравнениями  $z = x + j(d_1 + d_2 + \dots + d_i)$ . Найдем положение точки  $jv_0$  для нижнего слоя положив  $z = x + jd_1$ . Тогда значение абсциссы  $x_0$ , удовлетворяющее уравнению:

$$\text{ch}\left(\frac{\pi x_0}{d}\right) = \frac{\cos\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)}{k}.$$

Следовательно, при  $k \ll 1$   $\operatorname{ch}\left(\frac{\pi x_0}{d}\right) = e^{\frac{\pi s}{d}}$  и при  $s/d \gg 1$  получаем, что  $x \approx s$ .

Таким образом, значение  $\operatorname{Im}(t_0) = j \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{\pi s}{d}\right)}{\sin\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)}$  велико, тогда  $jv_0 = F(jt_0, k) \approx \approx K'(k')$ .

Отсюда следует, что точка  $v_0$  находится на верхнем электроде (2, 6) в плоскости  $w$  (см. рис. 3, б).

Определим положение  $u_0$  на оси  $v$  плоскости  $w$ ,  $v_0 = F(t_0, k)$ . Значения  $t_0$  в этом случае определяются значениями слоев  $d_i$ . Найдем  $t_0$  для нижнего слоя из (3) задав  $z = jd_1$  и полагая  $d_i/d \ll 1$ . Учитывая, что  $k \ll 1$ , а  $\cos\left(\frac{\pi d_1}{d}\right) \approx 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)^2$ , получим  $t_0 \approx 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)^2$ .

Тогда  $v_0 = F(t_0, k) = \int_0^{1-x} \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}}$ ,

где  $x = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi d_1}{d}\right)^2$ . Определим  $v_0$ , представив интеграл в виде

$$v_0 = \int_0^1 \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}} - \int_1^{1-x} \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}}.$$

Интеграл  $\int_0^1 \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}} = K(k)$ ,

второй интеграл в равенстве при  $k \ll 1$  равен  $\int_1^{1-x} \frac{d\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)(1-\xi^2 k^2)}} = \arcsin\left(\frac{\pi d_1}{d}\right) \approx \frac{\pi d_1}{d}$ . Следова-

тельно, толщина первого слоя в области  $w$  равна  $K - u_0 = \frac{\pi d_1}{d}$ . Толщина произвольного  $i$ -го

слоя в плоскости  $w$  равна  $\frac{\pi d_i}{d}$ . Таким образом, многослойный конденсатор суммарной толщи-

ной  $d$  в плоскости  $w$  можно представить параллельно соединенными конденсаторами с толщинами слоев  $d_i$  и диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_i(x_i, T)$ . Погонная емкость такого конденсатора будет определена в виде

$$C = \frac{\varepsilon_0 \pi}{\left(\ln 4 + \frac{\pi s}{d}\right) d} \sum_{i=1} \varepsilon_i(x_i, T) d_i.$$

Считая, что  $\frac{\pi s}{d} \gg 1$ , запишем погонную

емкость конденсатора  $C = \frac{\varepsilon_0}{s} \sum_{i=1} \varepsilon_i(x_i, T) d_i$ .

Тогда эффективная диэлектрическая проницаемость многослойного планарного конденсатора

$$\varepsilon_{\text{эф}}(T) = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(x_i, T) d_i. \quad (6)$$

**Синтез многослойной сегнетоэлектрической структуры с заданной температурной зависимостью диэлектрической проницаемости.** Перейдем к рассмотрению эффективной диэлектрической проницаемости многослойной структуры с учетом ее зависимости от температуры, массовой доли бария в каждом слое и его толщины.

Для равных толщин слоев BST-структуры температурный коэффициент эффективной диэлектрической проницаемости можно записать в виде

$$\frac{\partial \varepsilon_{\text{эф}}(T)}{\partial T} = \frac{\partial \varepsilon_1(x_1, T)}{\partial T} + \frac{\partial \varepsilon_2(x_2, T)}{\partial T} + \frac{\partial \varepsilon_3(x_3, T)}{\partial T} + \dots + \frac{\partial \varepsilon_i(x_i, T)}{\partial T}.$$

На рис. 4 представлены зависимости производных диэлектрической проницаемости по температуре для BST-слоев при значениях  $x_1 = 0.2$ ,  $x_2 = 0.4$ ,  $x_3 = 0.5$ ,  $x_4 = 0.7$ . Видно, что в интервале температур для каждого значения  $x$  производные меняют знак. Следовательно, можно найти такую совокупность слоев с необходимыми значениями, которые позволят обеспечить минимальное изменение коэффициента эффективной диэлектрической проницаемости в заданном температурном диапазоне. Дополнительная возможность температурной стабилизации связана с выбором толщин слоев. Очевидно,

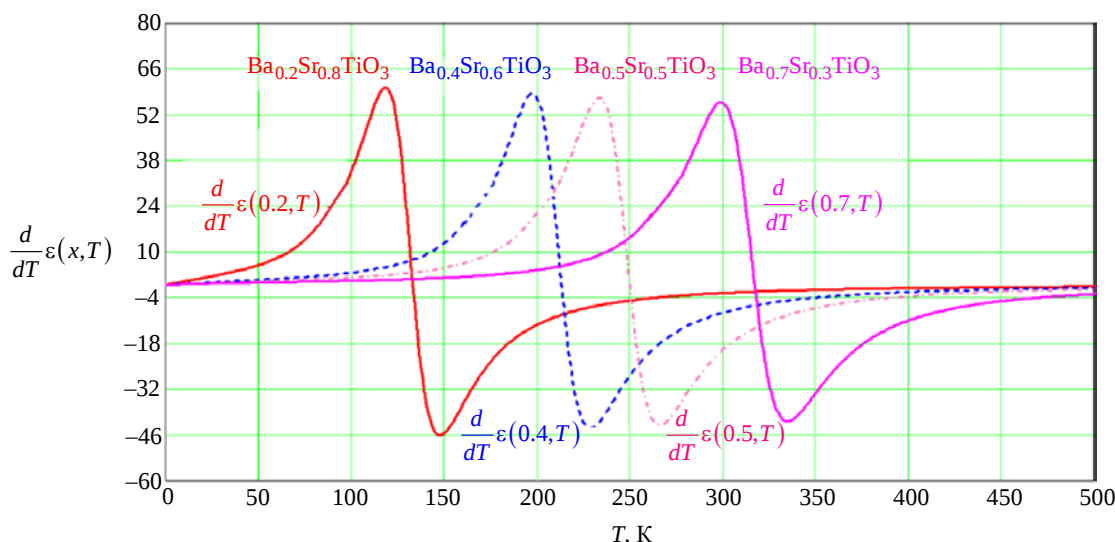


Рис. 4. Зависимости производных диэлектрической проницаемости нанослоев от температуры для различных массовых долей стронция в BST-структуре ( $x_1 = 0.2$ ;  $x_2 = 0.4$ ;  $x_3 = 0.5$ ;  $x_4 = 0.7$ )

Fig. 4. Dependences of the derivatives of the dielectric constant of nanolayers for different values of the concentration dependences BST ( $x_1 = 0.2$ ;  $x_2 = 0.4$ ;  $x_3 = 0.5$ ;  $x_4 = 0.7$ )

что в широком интервале температур невозможно обеспечить требуемый уровень температурной стабилизации  $\varepsilon_{\text{эф}}$  с тремя или четырьмя сегнетоэлектрическими слоями. Увеличение температурного интервала стабилизации  $\varepsilon_{\text{эф}}$  требует большего числа слоев.

Следовательно, можно найти такие значения параметров  $x_i$ ,  $d_i$  и количество слоев  $i$ , которые обеспечат требуемую температурную зависимость  $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$  с допустимым минимальным отклонением от заданного значения  $f(T)$ . Для оценки приближения  $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$  к требуемой  $f(T)$  найдем его среднеквадратическое отклонение на интервале температур  $T_1$ ,  $T_2$  в виде

$$M(x_i, d_i) = \int_{T_1}^{T_2} [f(T) - \varepsilon_{\text{эф}}(T)]^2 dT. \quad (7)$$

Минимальное значение  $M(x_i, d_i)$  будет отвечать такому набору параметров, которые обеспечат оптимальное приближение  $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$  к  $f(T)$ . Обнуление всех частных производных по  $x_i$  и  $d_i$  среднеквадратического отклонения  $M(x_i, d_i)$  приводит к системе уравнений. Подставим (6) в (7) и запишем систему уравнений

$$\frac{\partial M(x_i, d_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{T_1}^{T_2} \left[ f(T) - \frac{1}{2s} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(x_i, T) d_i \right]^2 dT = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial M(x_i, d_i)}{\partial d_i} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial d_i} \int_{T_1}^{T_2} \left[ f(T) - \frac{1}{2s} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(x_i, T) d_i \right]^2 dT = 0,$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Таким образом, задаваясь  $f(T)$  в требуемом температурном интервале и решая систему уравнений (8), определяем оптимальное значение слоев их толщин и концентрационных зависимостей.

На рис. 5 представлена структура плоскопараллельного сэндвич-конденсатора на многослойной сегнетоэлектрической структуре со слоями диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{Ni}$ , толщиной  $d_{Ni}$ , сформированной на диэлектрической подложке с  $\varepsilon_1$ ,  $d_1$ . Рассмотрим случай, когда сегнетоэлектрическая структура расположена между металлическими электродами при  $\Delta \gg d$  (рис. 5, б).

Такая структура представляет собой конденсатор с последовательным соединением емкостей, следовательно, суммарная емкость дан-

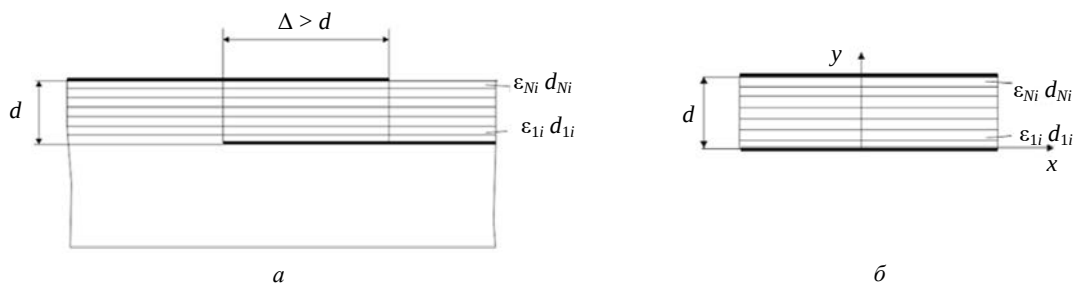


Рис. 5. Поперечное сечение сэндвич-конденсатора на многослойной сегнетоэлектрической структуре:  
а –  $\Delta > d$ ; б –  $\Delta \gg d$

Fig. 5. Cross section of a sandwich capacitor on a multilayer ferroelectric structure: а –  $\Delta > d$ ; б –  $\Delta \gg d$

ного конденсатора  $C = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$ . Тогда эффективная диэлектрическая проницаемость такой структуры запишется в виде

$$\varepsilon_{\text{эф}}(x_i, d_i, T) = \frac{d}{\frac{d_1}{\varepsilon_1(x_1, T)} + \frac{d_2}{\varepsilon_2(x_2, T)} + \dots + \frac{d_N}{\varepsilon_N(x_N, T)}}.$$

Запишем систему уравнений для определения параметров, приближающих температурную зависимость эффективной диэлектрической проницаемости к заданной  $f(T)$  по наименьшему среднему квадратическому отклонению для сэндвич-конденсатора, в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial M(x_i, d_i)}{\partial x_i} &= \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{T_1}^{T_2} \left[ f(T) - \frac{d}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\varepsilon_{\text{эф}}(x_i, d_i, T)}} \right]^2 dT &= 0; \\ \frac{\partial M(x_i, d_i)}{\partial d_i} &= \\ \frac{\partial}{\partial d_i} \int_{T_1}^{T_2} \left[ f(T) - \frac{d}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\varepsilon_{\text{эф}}(x_i, d_i, T)}} \right]^2 dT &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

На рис. 6–8 представлены графики температурных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости многослойной щелевой структуры для различного количества сегнето-

электрических слоев, полученных из решений систем уравнений (8) и (9). Из графиков видно, что с увеличением числа слоев расширяется температурный интервал стабилизации эффективной диэлектрической проницаемости.

На рис. 9 показаны численные результаты расчета температурных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости пяти-слойной сэндвич-структуры.

Таким образом, результаты расчетов показывают, что заданием количества слоев BST возможно нахождение их концентрационных зависимостей и толщин, которые обеспечат необходимое значение эффективной диэлектрической проницаемости слоистой сегнетоэлек-

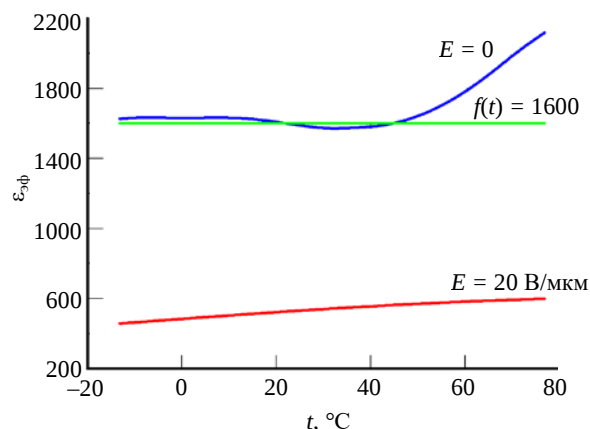


Рис. 6. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от температуры и управляющего электрического поля в планарном щелевом конденсаторе для трехслойной структуры при  $s = 10$  мкм;  $x_1 = 0.401$ ;  $x_2 = 0.59$ ;  $x_3 = 0.74$ ;  $d_1 = 0.3$  мкм;  $d_2 = 0.1$  мкм;  $d_3 = 0.6$  мкм;  $d = 0.5$  мм

Fig. 6. Dependence of the effective dielectric constant on temperature and the control electric field in a planar slit capacitor for a three-layer structure, when  $s = 10$   $\mu\text{m}$ ;  $x_1 = 0.401$ ;  $x_2 = 0.59$ ;  $x_3 = 0.74$ ;  $d_1 = 0.3$   $\mu\text{m}$ ;  $d_2 = 0.1$   $\mu\text{m}$ ;  $d_3 = 0.6$   $\mu\text{m}$ ;  $d = 0.5$  mm

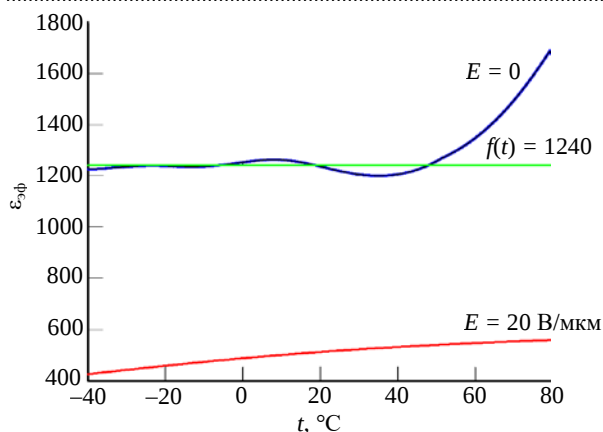


Рис. 7. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от температуры и управляющего электрического поля в планарном щелевом конденсаторе для четырехслойной структуры при  $s = 10$  мкм;  $x_1 = 0.21$ ;  $x_2 = 0.25$ ;  $x_3 = 0.4$ ;  $x_4 = 0.82$ ;  $d_1 = 0.2$  мкм;  $d_2 = 0.17$  мкм;  $d_3 = 0.15$  мкм;  $d_4 = 0.35$  мкм;  $d = 0.5$  мм;  $\epsilon_1 = 9.8$

Fig. 7. Dependence of the effective dielectric constant on temperature and the control electric field in a planar slit capacitor for a four-layer structure, when  $s = 10$   $\mu\text{m}$ ;  $x_1 = 0.21$ ;  $x_2 = 0.25$ ;  $x_3 = 0.4$ ;  $x_4 = 0.82$ ;  $d_1 = 0.2$   $\mu\text{m}$ ;  $d_2 = 0.17$   $\mu\text{m}$ ;  $d_3 = 0.15$   $\mu\text{m}$ ;  $d_4 = 0.35$   $\mu\text{m}$ ;  $d = 0.5$  mm;  $\epsilon_1 = 9.8$

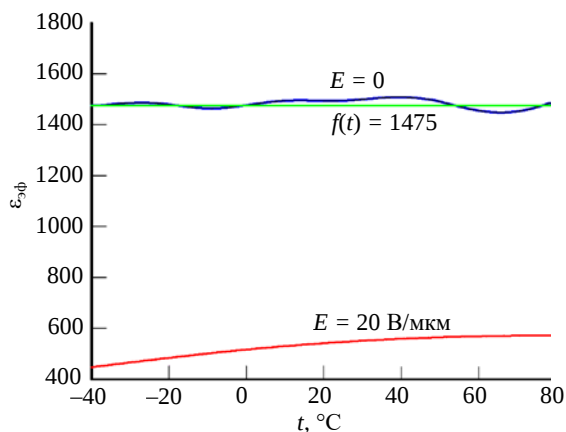


Рис. 8. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от температуры и управляющего электрического поля в планарном щелевом конденсаторе для пятислойной структуры при  $s = 10$  мкм;  $x_1 = 0.17$ ;  $x_2 = 0.5$ ;  $x_3 = 0.37$ ;  $x_4 = 0.7$ ;  $x_5 = 0.87$ ;  $d_1 = 0.19$  мкм;  $d_2 = 0.28$  мкм;  $d_3 = 0.34$  мкм;  $d_4 = 0.21$  мкм;  $d_5 = 0.19$  мкм;  $d = 0.5$  мм;  $\epsilon_1 = 9.8$

Fig. 8. Dependence of the effective dielectric constant on temperature and the control electric field in a planar slit capacitor for a five-layer structure, at  $s = 10$   $\mu\text{m}$ ;  $x_1 = 0.17$ ;  $x_2 = 0.5$ ;  $x_3 = 0.37$ ;  $x_4 = 0.7$ ;  $x_5 = 0.87$ ;  $d_1 = 0.19$   $\mu\text{m}$ ;  $d_2 = 0.28$   $\mu\text{m}$ ;  $d_3 = 0.34$   $\mu\text{m}$ ;  $d_4 = 0.21$   $\mu\text{m}$ ;  $d_5 = 0.19$   $\mu\text{m}$ ;  $d = 0.5$  mm;  $\epsilon_1 = 9.8$

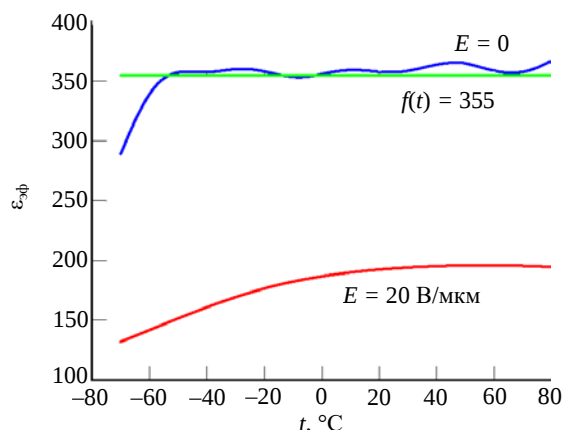


Рис. 9. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от температуры и управляющего электрического поля в сэндвич-конденсаторе для пятислойной структуры при  $x_1 = 0.72$ ;  $x_2 = 0.54$ ;  $x_3 = 0.22$ ;  $x_4 = 0.4$ ;  $x_5 = 0.9$ ;  $d_1 = 0.23$  мкм;  $d_2 = 0.16$  мкм;  $d_3 = 0.19$  мкм;  $d_4 = 0.11$  мкм;  $d_5 = 0.2$  мкм;  $d = 0.5$  мм;  $\epsilon_1 = 9.8$

Fig. 9. Dependence of the effective dielectric constant on temperature and the control electric field in a sandwich capacitor for a five-layer structure, when, at  $x_1 = 0.72$ ;  $x_2 = 0.54$ ;  $x_3 = 0.22$ ;  $x_4 = 0.4$ ;  $x_5 = 0.9$ ;  $d_1 = 0.23$   $\mu\text{m}$ ;  $d_2 = 0.16$   $\mu\text{m}$ ;  $d_3 = 0.19$   $\mu\text{m}$ ;  $d_4 = 0.11$   $\mu\text{m}$ ;  $d_5 = 0.2$   $\mu\text{m}$ ;  $d = 0.5$  mm;  $\epsilon_1 = 9.8$

трической структуры в заданном температурном интервале.

**Закключение.** Рассмотренные расчетные модели показали, что стабилизация электрических параметров в плоскопараллельном и щелевом конденсаторах на многослойной сегнетоэлектрической структуре может быть достигнута за счет выбора количества слоев, их толщин и концентрационных зависимостей и определяется требуемой температурной стабилизацией эффективной диэлектрической проницаемости. Увеличение количества слоев в BST-структуре позволяет расширить температурный диапазон стабилизации  $\epsilon_{\text{эф}}$  и обеспечить приемлемую управляемость ее характеристиками. Температурный интервал стабилизации  $\epsilon_{\text{эф}}$ , оцениваемой единицами процента отклонения от среднего значения, достигает 120...160° при количестве сегнетоэлектрических слоев в структуре более шести.

#### Авторский вклад

**Мироненко Игорь Германович** – формулировка и постановка задачи нахождения эффективной диэлектрической проницаемости в слоистой структуре; вывод аналитических выражений для поиска искомого значения эффективной диэлектрической проницаемости и емкости в слоистой структуре.

**Соколов Сергей Сергеевич** – анализ возможности температурной стабилизации эффективной диэлектрической проницаемости в слоистой структуре.

**Шевченко Майя Евгеньевна** – проектирование структур на многослойных сегнетоэлектрических пленках.

**Севериков Василий Сергеевич** – нахождение оптимальных значений стехиометрических составов сегнетоэлектрических слоев для обеспечения температурной стабилизации планарного щелевого конденсатора.

**Фам Конг Че** – нахождение оптимальных значений толщин с учетом стехиометрических составов сегнетоэлектрических слоев для обеспечения температурной стабилизации планарного щелевого конденсатора.

**Протченко Артемий Игоревич** – нахождение оптимальных значений толщин и стехиометрических составов сегнетоэлектрических слоев для обеспечения температурной стабилизации сэндвич-конденсатора.

**Шарова Наталья Николаевна** – создание программы расчета концентрационной зависимости, толщины и количества слоев в многослойной сегнетоэлектрической структуре.

**Буровихин Антон Павлович** – выполнение процесса оптимизации температурной стабильности в сэндвич-конденсаторе.

**Иванов Аркадий Анатольевич** – постановка и решение задачи нахождения эффективной диэлектрической проницаемости в слоистых щелевой и сэндвич-структурах для обеспечения температурно-стабильного значения емкости в конденсаторах, созданных на их основе.

### Author's contribution

**Igor G. Mironenko**, formulation and statement of the problem of finding the effective permittivity in a layered structure; derivation of analytical expressions for finding the desired value of the effective permittivity and capacitance in a layered structure.

**Sergey S. Sokolov**, analysis of the possibility of temperature stabilization of the effective permittivity in a layered structure.

**Maya E. Shevchenko**, design of structures on multilayer ferroelectric films.

**Vasily S. Severikov**, finding the optimal values of the stoichiometric compositions of ferroelectric layers to ensure temperature stabilization of a planar slot capacitor.

**Fam Kong Che**, finding the optimal values of thicknesses taking into account the stoichiometric compositions of ferroelectric layers to ensure temperature stabilization of a planar slot capacitor.

**Artemy I. Protchenko**, finding optimal values of thicknesses and stoichiometric compositions of ferroelectric layers to ensure temperature stabilization of a sandwich capacitor.

**Natalia N. Sharova**, creating a program for calculating the concentration dependence, thickness and number of layers in a multilayer ferroelectric structure.

**Anton P. Burovikhin**, performing the process of optimizing temperature stability in a sandwich capacitor.

**Arkady A. Ivanov**, setting and solving the problem of finding the effective permittivity in layered slot and sandwich structures to ensure a temperature-stable capacitance value in capacitors created on their basis.

### Список литературы

1. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Н. Н. Антонов, И. М. Бузин, О. Г. Вендик и др.; под ред. О. Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979. 272 с.

2. Вербицкая Т. Н., Александрова Л. М., Широкова Е. И. Электрические свойства пленочных варикондов с прямоугольной петлей гистерезиса // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1965. Т. 29. С. 2104.

3. СВЧ-свойства сегнетоэлектрических пленок с размытым фазовым переходом / О. Г. Вендик, С. П. Зубко, М. С. Гашинова, Н. Ю. Некрасова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2005. Вып. 1. С. 15–19.

4. Вербицкая Т. Н. Титанат бария. М.: Наука, 1973. 273 с.

5. Диэлектрические свойства тонких пленок  $\text{SrTiO}_3$  и  $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{TiO}_3$  / Б. М. Гольцман, В. В. Леманов, А. И. Дедык, Л. Т. Тер-Мартirosян, С. Ф. Карманенко // ФТТ. 1996. Т. 38, вып. 8. С. 2493–2496.

6. Технология и диэлектрические свойства многослойных нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок / В. М. Балашов, И. Г. Мироненко, А. А. Ива-

нов, А. И. Фирсенков, Д. В. Велькин, О. В. Яковлев, Н. А. Емельянов // Вопр. радиоэлектроники. 2018. № 1. С. 62–67.

7. Применение наноразмерных пленок титаната бария-стронция для перестраиваемых сверхвысоко-частотных устройств / Вас. М. Мухортов, С. И. Масычев, Ю. И. Головкин, А. В. Чуб, В. М. Мухортов // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 10. С. 106–109.

8. СВЧ фазовращатель с планарными конденсаторами на основе пленок титаната стронция / А. Козырев, А. Иванов, О. Солдатенков, Е. Гольман, А. Прудан, В. Логинов // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, вып. 20. С. 78–83.

9. Composition-control of magnetron-sputter-deposited  $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$  thin films for voltage tunable devices / Im. Jaemo, O. Auciello, P. K. Baumann, S. K. Streiffer, D. Kaufman, A. R. Krauss // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 625–627. doi: 10.1063/1.125839

10. The fabrication and material properties of compositionally multilayered  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  thin films for realiza-

tion of temperature insensitive tunable phase shifter devices / M. W. Cole, E. Ngo, S. Hirsch, J. D. Demaree, S. Zhong, S. P. Alpay // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102. P. 034104. doi: 10.1063/1.2761849

11. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах / А. А. Иванов, И. Г. Мироненко, С. Ф. Карманенко и др. СПб.: Элмор, 2007. 162 с.

12. Маркушевич А. И. Краткий курс теории аналитических функций. 4-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1978. 416 с.

13. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1973. 736 с.

14. Лаврентьев М. А. Конформные отображения. М.; Л.: Гостехиздат, 1946. 160 с.

15. Layered planar capacitor based on  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  with variable parameter  $x$  / O. G. Vendik, S. P. Zubko, S. F. Karmanenko, M. A. Nikol'ski, N. N. Isakov, I. T. Serenkov, V. I. Sakharov // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91, № 1. P. 331–335. doi: 10.1063/1.1421035

### Информация об авторах

**Мироненко Игорь Германович** – доктор технических наук (1979), профессор (1981) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры и устройств СВЧ-диапазона. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: eltech-mit-mig@gmail.com

**Соколов Сергей Сергеевич** – доктор технических наук (1993), профессор (1995) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры и устройств СВЧ-диапазона. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: sovet@etu.ru

**Шевченко Майя Евгеньевна** – кандидат технических наук (1997), доцент (2002) кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 80 научных работ. Сфера научных интересов – прием и обработка радиосигналов; обнаружение, оценивание и пеленгование сигналов, радиомониторинг; цифровая обработка сигналов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: M\_E\_Shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru

**Севериков Василий Сергеевич** – магистр по специальности "Техническая физика" (2019, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого), аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: severva3@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5247-6006>

**Фам Конг Че** – магистр по специальности "Радиоэлектронные системы" (2016, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны), аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикации. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: kxanhlinhdangthdtrach@gmail.com

**Протченко Артемий Игоревич** – инженер по специальности "Материаловедение и технологии новых материалов" (2000, Санкт-Петербургский горный институт), заместитель генерального директора по государственному оборонному заказу АО «НИИ "Феррит-Домен"». Автор ряда закрытых публикаций по синтезу материалов для применения в СВЧ-устройствах высокого уровня мощности. Сфера научных интересов – разработка ферритовых и диэлектрических материалов для пассивной ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: АО «НИИ "Феррит-Домен"», ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия  
E-mail: a.i.protchenko@domen.ru

**Шарова Наталья Николаевна** – инженер по специальности "Прикладная математика и информатика" (1997, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля), заместитель генерального директора

Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и емкости щелевого

и плоскопараллельного конденсаторов с высокой температурной стабильностью

характеристик на основе многослойной сегнетоэлектрической структуры

Calculation of the Effective Dielectric Constant and Capacitance of Slit and Plane-Parallel Capacitors with High Temperature Stability Characteristics Based on a Multilayer Ferroelectric Structure

АО «НИИ "Феррит-Домен"». Сфера научных интересов – разработка математических моделей для ЭКБ.  
Адрес: АО «НИИ "Феррит-Домен"», ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия  
E-mail: n.n.sharova@domen.ru

**Буровихин Антон Павлович** – инженер 2-й категории лаборатории технологии материалов и элементов интегральной радиофотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 24 научных публикаций. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; мультиферроики; пироэлектричество; электрокалорика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: antonburovihin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5147-0630>

**Иванов Аркадий Анатольевич** – доктор технических наук (2018), профессор (2020) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aai2@yandex.ru

## References

1. Antonov N. N., Buzin I. M., Vendik O. G. *Segnetoelektriki v tekhnike SVCh* [Ferroelectrics in Microwave Technology]. Ed. by O. G. Vendik. Moscow, Soviet Radio, 1979, 272 p. (In Russ.)
2. Verbitskaya T. N., Alexandrova L. M., Shirobokova E. I. Electrical Properties of Film Variconds with a Rectangular Hysteresis Loop. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 1965, vol. 29, p. 2104. (In Russ.)
3. Vendik O. G., Zubko S. P., Gashinova M. S., Nekrasova N. Yu. *SVCh-svoistva segnetoelektricheskikh plenok s razmytym fazovym perekhodom* [Microwave Properties of Ferroelectric Films with a Blurred Phase Transition]. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2005, iss. 1, pp. 15–19. (In Russ.)
4. Verbitskaya T. N. *Titanat bariya* [Barium Titanate]. Moscow, Nauka, 1973, 273 p. (In Russ.)
5. Gol'tsman B. M., Lemanov V. V., Dedyk A. I., Ter-Martirosyan L. T., Karmanenko S. F. Electrical Properties of a Thin Layer of  $\text{SrTiO}_3$  and  $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{TiO}_3$ . *Physics of the Solid State*. 1996, vol. 38, iss. 8, pp. 2493–2496. (In Russ.)
6. Balashov V. M., Mironenko I. G., Ivanov A. A., Firsenskov A. I., Velkin D. V., Yakovlev O. V., Emelyanov N. A. Technology and Dielectric Properties of Nanocomposite Multilayer Ferroelectric Films. *Questions of Radio Electronics*. 2018, no. 1, pp. 62–67. (In Russ.)
7. Mukhortov Vas. M., Masyshev S. I., Golovko Yu. I., Chub A. V., Mukhortov V. M. Application of Nanoscale Films of Barium-Strontium Titanate for Tunable Ultrahigh Frequency Devices. *Technical Physics*. 2006, vol. 76, iss. 10, pp. 106–109. (In Russ.)
8. Kozyrev A., Ivanov A., Soldatenkov O., Golman E., Prudan A., Loginov V. Microwave Phase Shifter with Planar Capacitors Based on Strontium Titanate Films. *Technical Physics Lett.* 1999, vol. 25, iss. 20, pp. 78–83. (In Russ.)
9. Jaemo Im., Auciello O., Baumann P. K., Streiffer S. K., Kaufman D., Krauss A. R. Composition-control of Magnetron-Sputter-Deposited  $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$  Thin Films for Voltage Tunable Devices. *Appl. Phys. Lett.* 2000, vol. 76, pp. 625–627. doi: 10.1063/1.125839
10. Cole M. W., Ngo E., Hirsch S., Demaree J. D., Zhong S., Alpay S. P. The Fabrication and Material Properties of Compositionally Multilayered  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  thin Films for Realization of Temperature Insensitive Tunable Phase Shifter Devices. *J. Appl. Phys.* 2007, vol. 102, p. 034104. doi: 10.1063/1.2761849
11. Ivanov A. A., Mironenko I. G., Karmanenko S. F., Semenov A. A., Nazarov I. A. *Segnetoelektricheskie plenki i ustroistva na sverkh- i kraine vysokikh chastotakh* [Ferroelectric Films and Devices at Ultra- and Extremely High Frequencies]. St Petersburg, Elmore, 2007, 162 p. (In Russ.)
12. Markushevich A. I. *Kratkii kurs teorii analiticheskikh funktsii* [A Short Course in the Theory of Analytical Functions]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Nauka, 1978, 416 p. (In Russ.)
13. Lavrentyev M. A., Khabat B. V. *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo* [Methods of Theoretical Analysis]. Moscow, Nauka, 1973, 736 p. (In Russ.)
14. Lavrentiev M. A. *Konformnye otobrazheniya* [Official Images]. Moscow; Leningrad, Gosizdat, 1946, 160 p. (In Russ.)
15. Vendik O. G., Zubko S. P., Karmanenko S. F., Nikol'ski M. A., Isakov N. N., Serenkov I. T., Sakharov V. I. Layered Planar Capacitor Based on  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  with Variable Parameter  $x$ . *J. Appl. Phys.* 2002, vol. 91, no. 1, pp. 331–335. doi: 10.1063/1.1421035

## Information about the authors

**Igor G. Mironenko**, Dr Sci. (Eng.) (1979), Professor (1981) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: eltech-mit-mig@gmail.com

**Sergey S. Sokolov**, Dr Sci. (Eng.) (1993), Professor (1995) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: sovet@etu.ru

**Maya E. Shevchenko**, Cand. Sci. (Eng.) (1997), Associate Professor (2002) of the Department of Radio Electronics Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 80 scientific publications. Area of expertise: radio signal reception and processing; signal detection, evaluation and direction finding, radio monitoring; digital signal processing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia  
E-mail: m\_e\_shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6873-6354>

**Vasily S. Severikov**, Master in Technical Physics (2019, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University), Postgraduate student of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: development of electronic components and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: severva3@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-5247-6006>

**Fam Kong Che**, Master in Radioelectronic systems (2016, Yaroslavl Higher Military Institute of the Air Defense), Postgraduate student of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: development of electronic components and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: kxanhlinhdangthdtrach@gmail.com

**Artemy I. Protchenko**, engineer in Materials Science and Technologies of New Materials (2000, St Petersburg Mining Institute), Deputy Director General for State Equipment Order of Ferrite-Domen Scientific Research Institute. The author of a number of closed publications on the synthesis of materials for use in high-power microwave devices. Area of expertise: development of ferrite and dielectric materials for passive ECB and microwave devices.

Address: Ferrite-Domen Scientific Research Institute, 25, build. 3, let. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg 196006, Russia  
E-mail: a.i.protchenko@domen.ru

**Natalia N. Sharova**, Engineer in Applied Mathematics and Computer Science (1997, Vladimir Dahl East Ukrainian National University), Deputy General Director of Ferrite-Domen Scientific Research Institute. Area of expertise: development of mathematical models for ECB.

Address: Ferrite-Domen Scientific Research Institute, 25, build. 3, let. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg 196006, Russia  
E-mail: n.n.sharova@domen.ru

**Anton P. Burovikhin**, engineer of the Laboratory of Technology of Materials and Elements of Integrated Radiophotonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 24 scientific publications. Area of expertise: ferroelectrics; multiferroics; pyro-electricity; electrocaloris.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: antonburovihin@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5147-0630>

**Arkady A. Ivanov**, Dr Sci. (2018), Professor (2020) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: aai2@yandex.ru

---

## Оценка состояния функционирования фазированной антенной решетки при нарушении работоспособности фазовращателей антенных элементов

М. Р. Бибарсов<sup>1,2✉</sup>, А. Ф. Крячко<sup>1</sup>, А. В. Пшеничников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия

✉ [bibarsovmr@rambler.ru](mailto:bibarsovmr@rambler.ru)

### Аннотация

**Введение.** Функционирование многоэлементных антенных систем, в частности волноводно-щелевых фазированных антенных решеток (ВЩФАР) со стабильными характеристиками, позволяет обеспечить требуемые показатели эффективности помехозащищенности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств различного назначения. Однако случайный характер изменения фаз антенных элементов (АЭ) в результате неисправностей фазовращателей (ФВ) приводит к резкому ухудшению этих показателей. Поэтому оценка состояния функционирования ВЩФАР при выходе из строя ФВ с любым исходом является актуальной задачей и требует дальнейшего развития. В статье обобщены алгоритмы моделирования влияния отказов на характеристики ВЩФАР и приведены оценки состояния таких антенных систем при указанных неисправностях.

**Цель работы.** Разработка алгоритма влияния полного выключения ФВ на характеристики ВЩФАР, а также оценка состояния ВЩФАР при нарушении работоспособности ФВ АЭ с различным исходом.

**Материалы и методы.** При исследовании влияния отказов на характеристики ВЩФАР использовались методы статистического моделирования. Расчеты проводились на ЭВМ с помощью пакета прикладной математики Mathcad 15.

**Результаты.** Обобщены результаты моделирования 3 видов неисправностей, при которых устанавливались следующие параметры ФВ: фаза принимала значение, равное 0, вместо требуемого; фаза принимала случайное значение с дискретом 22.5° вместо требуемого; полное выключение ФВ. При исследовании до 35 неисправных ФВ АЭ из 50 элементов получено изменение следующих характеристик: среднеквадратичное отклонение – от 0.056 до 0.18; относительные значения: ширина диаграммы направленности – от 8 до 32 %; уровень боковых лепестков – от 13 до 78 %; мощность излучения – от 0.9 до 0.31. Сформирован диапазон состояний ВЩФАР при наступлении отказов ФВ: "нормальная работа" – до 7 неисправных ФВ; "ухудшение параметров" – от 7 до 12 неисправных ФВ; "отказ" – более 12 неисправных ФВ.

**Заключение.** Полученные результаты исследований могут быть обобщены и использованы в радиоэлектронных системах с антенными решетками на этапе их разработки. Дальнейшие направления исследований могут быть направлены на разработку методики эксплуатационного контроля состояния антенных систем, а также исследование компенсации искажений характеристик при их неисправностях.

**Ключевые слова:** волноводно-щелевая фазированная антенная решетка, фазовращатель, диаграмма направленности, среднеквадратичное отклонение, ширина диаграммы направленности, уровень боковых лепестков, мощность излучения, статистическое моделирование, оценка состояния функционирования ВЩФАР

**Для цитирования:** Бибарсов М. Р., Крячко А. Ф., Пшеничников А. В. Оценка состояния функционирования фазированной антенной решетки при нарушении работоспособности фазовращателей антенных элементов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 20–29. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-20-29

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024; принята к публикации после рецензирования 04.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

## Operation Evaluation of Phased Antenna Arrays in Case of Phase Shifter Malfunction

Marat R. Bibarsov<sup>1,2✉</sup>, Alexander F. Kryachko<sup>1</sup>, Alexander V. Pshenichnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

✉ bibarsovmr@rambler.ru

### Abstract

**Introduction.** Stable operation of multi-element antenna systems, in particular waveguide-slotted phased antenna arrays (WSPAA), ensures the required noise immunity and electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment for various purposes. However, such performance indicators are subject to deterioration due to the random nature of changes in the phases of antenna elements (AE) under the action of malfunction of phase shifters (PS). Therefore, operation evaluation of WSPAAs in the event of PS failure with any outcome is an urgent research task. The paper reviews algorithms for modeling the impact of PS failures on WSPAAs and evaluates the operation of such antenna systems under these impacts.

**Aim.** Development of an algorithm for assessing the impact of a complete PS shutdown on WSPAA characteristics, as well as operation evaluation of WSPAAs in the event of PS malfunction with different outcomes.

**Materials and methods.** Statistical modeling methods were used to study the impact of PS failures on WSPAA characteristics. Calculations were carried out using in the Mathcad 15 software environment.

**Results.** The conducted simulation revealed three types of faults, for which the following PS parameters were set: the phase took a value equal to 0, instead of the required one; the phase took a random value with a discrete value of 22.5°, instead of the required one; complete switching off of the PS. When studying up to 35 faulty PS of an AE from 50 elements, the following characteristics were changed: standard deviation – from 0.056 to 0.18; relative values: radiation pattern width – from 8 to 32 %; level of side lobes – from 13 to 78 %; radiation power – from 0.9 to 0.31. A range of WSPAA states was formed upon the occurrence of PS failures: "Normal operation" – up to 7 faulty PS; "Deterioration of parameters" – from 7 to 12 faulty PS; "Failure" – more than 12 faulty PS.

**Conclusion.** The results obtained can be used when designing radio-electronic systems with antenna arrays. Future research should be aimed at developing a methodology for operational monitoring of the state of antenna systems, as well as studying the compensation of characteristic distortions in case of various malfunctions.

**Keywords:** waveguide-slot phased antenna array, phase shifter, radiation pattern, standard deviation, radiation pattern width, side lobe level, radiation power, statistical modeling, WSPAA operation evaluation

**For citation:** Bibarsov M. R., Kryachko A. F., Pshenichnikov A. V. Operation Evaluation of Phased Antenna Arrays in Case of Phase Shifter Malfunction. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 20–29. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-20-29

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 02.10.2024; accepted 04.11.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Радиоэлектронные системы (РЭС) с многоэлементными антеннами, в частности волноводно-щелевыми фазированными антенными решетками (ВЦФАР), широко применяются в радиолокации, радиосвязи, радиоастрономии и т. д. [1–18]. Для эффективной работы таких систем необходимо преду-

смотреть выполнение ряда задач, из которых отдельно стоит отметить обеспечение электромагнитной совместимости и помехозащищенности РЭС. Эти задачи связаны с широким использованием различной радиоэлектронной аппаратуры, а следовательно, с ростом числа одновременно излучающих и приемных антенн, что

приводит к возникновению преднамеренных и непреднамеренных помех. Для обеспечения электромагнитной совместимости и помехозащищенности РЭС применяются помехоустойчивые сигнально-кодовые конструкции [19–23] либо антенны, имеющие возможно больший коэффициент усиления (КУ) и низкий уровень боковых лепестков (УБЛ) диаграммы направленности (ДН) [1–5].

Другой важнейшей задачей является снижение ошибок амплитудно-фазового распределения, возникающих на полотне ВЦФАР и значительно влияющих на потери потенциала в РЭС [24–27]. Такие ошибки могут возникать в том числе в результате нарушения работоспособности фазовращателей (ФВ) антенных элементов (АЭ) ВЦФАР. Это, в свою очередь, ухудшает электрические характеристики ВЦФАР: искажается ДН, увеличивается ширина ее главного лепестка (ширина диаграммы направленности – ШДН), увеличивается УБЛ, уменьшается коэффициент направленного действия (КНД), КУ, мощность излучения и др. В результате изменения требуемых характеристик, предъявляемых к ВЦФАР, ухудшаются показатели эффективности помехозащищенности и электромагнитной совместимости РЭС в целом. Анализ научной литературы показывает, что исследования в этом направлении требуют дальнейшего развития.

В [28, 29] разработаны алгоритмы влияния изменения фазирования АЭ на электрические параметры ВЦФАР в случаях, когда фаза неисправных ФВ становится равной нулю либо фаза в ФВ устанавливается случайным образом с дискретом

22.5° (далее – варианты 1 и 2). Полученные результаты сведены в табл. 1 и 2 соответственно [28–30].

В данной статье рассмотрим 3-й вариант выхода из строя ФВ, когда мощность не проходит в антенные элементы, а также обобщим результаты моделирования алгоритмов трех вариантов и проведем оценку состояния ВЦФАР в этих случаях.

Целью представленной статьи является разработка алгоритма влияния полного выключения ФВ на характеристики ВЦФАР, а также оценка состояния ВЦФАР при нарушении работоспособности ФВ АЭ с различным исходом.

**Постановка задачи разработки алгоритма.** Пусть произошла неисправность некоторого числа ФВ АЭ и при этом мощность не проходит в излучатель, т. е. излучатель просто перестает работать. В таком случае, чтобы учесть влияние неисправного ФВ, надо вычесть излучение, которое он давал при исправной работе, из исходного, без добавления другого излучения, при учете местоположения (номера излучателя) неисправного ФВ в полотне антенной решетки. Исходными параметрами моделирования алгоритма, как и в первых двух вариантах неисправностей, являются следующие:

- диапазон рабочих частот  $\Delta f_{\text{раб}} = 5 \dots 5.750$  ГГц
- и, соответственно, диапазон длин волн  $\Delta \lambda_{\text{раб}} = 5.21 \dots 6$  см;
- средняя частота  $f_{\text{ср}} = 5.375$  ГГц и, соответственно, средняя длина волны  $\lambda = 5.58$  см;
- волновой размер антенны  $l/\lambda \approx 180/2\pi \approx 30$  ( $l$  – длина ВЦФАР);

Табл. 1. Результаты моделирования отказов ФВ для первого варианта

Tab. 1. Simulation results of phase shifter failures for the first option

| Параметр                            | Количество неисправных ФВ |      |     |      |      |      |      |
|-------------------------------------|---------------------------|------|-----|------|------|------|------|
|                                     | 5                         | 10   | 15  | 20   | 25   | 30   | 35   |
| Относительный УБЛ, %                | 13                        | 16   | 18  | 32   | 38   | 50   | 59   |
| Относительная ШДН, %                | 8                         | 10   | 11  | 13   | 15   | 16   | 18   |
| Мощность излучения в $\theta_0$ , % | 0.9                       | 0.82 | 0.7 | 0.65 | 0.5  | 0.42 | 0.3  |
| СКО                                 | 0.064                     | 0.09 | 0.1 | 0.12 | 0.15 | 0.17 | 0.18 |

Табл. 2. Результаты моделирования отказов ФВ для второго варианта

Tab. 2. Simulation results of phase shifter failures for the second option

| Параметр                            | Количество неисправных ФВ |       |      |       |     |      |      |
|-------------------------------------|---------------------------|-------|------|-------|-----|------|------|
|                                     | 5                         | 10    | 15   | 20    | 25  | 30   | 35   |
| Относительный УБЛ, %                | 13                        | 27    | 36   | 40    | 54  | 59   | 72   |
| Относительная ШДН, %                | 9                         | 13    | 16   | 18    | 21  | 24   | 32   |
| Мощность излучения в $\theta_0$ , % | 0.9                       | 0.81  | 0.7  | 0.62  | 0.5 | 0.42 | 0.31 |
| СКО                                 | 0.034                     | 0.063 | 0.08 | 0.085 | 0.1 | 0.13 | 0.15 |

- расстояние между излучателями  $d = 0.60\lambda$ ;
- количество излучателей  $N = 30/0.60 = 50$ ;
- направление максимального излучения  $\theta_0 = 20^\circ$ ;
- объем статистической выборки  $N_B = 50$ ;
- количество отказов ФВ  $M < 35$ ;
- сектор углов для расчетов  $-40^\circ < \theta < 40^\circ$ ;
- волновое число  $k = 2\pi/\lambda$ ;
- мнимая единица  $i = \sqrt{-1}$ .

Исходные данные выбраны из соображений применения их в РЭС радиосвязи и радиолокации.

**Алгоритм моделирования.** Для достижения поставленной цели с учетом постановки задачи в статье представлена процедура моделирования влияния полного отключения ФВ АЭ на электрические характеристики ВЩФАР. Пошаговая последовательность выполнения алгоритма заключается в следующем.

На первом шаге вводятся перечисленные исходные параметры.

На втором шаге организуются циклы определения случайным образом методом перебора: всех элементов линейной ВЩФАР; количества дефектных ФВ. Таким образом, формируются номера неисправных ФВ АЭ, т. е. их место в ВЩФАР.

На третьем шаге в соответствии с формулой

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \exp[i2kdn(\sin \theta - \sin \theta_0)] \quad (1)$$

вычисляются значения исходной нормированной характеристики направленности (функции направленности) при отсутствии неисправностей.

На четвертом шаге определяем значения нормированной характеристики направленности, когда мощность не проходит в АЭ, функция которой имеет вид

$$F1(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N [F(\theta) - \left( \sum_{p=0}^M \left\{ \frac{1}{N} \exp[i2kdm_{n,p}(\sin \theta - \sin \theta_0)] \right\} \right) \frac{1}{N_B}]. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет учитывать номер ФВ  $m_{n,p}$  в линейке антенных элементов ВЩФАР.

На пятом шаге для расширения статистической выборки вычисления шагов 2 и 3 повторяются  $N_B$  раз.

На шестом шаге вычисляется среднее значение нормированной характеристики направленности и среднеквадратичное отклонение (СКО) этой функции при неисправностях ФВ АЭ в соответствии с выражением

$$\sigma(\theta) = \left\langle \sum_{n=1}^{N_B} \left\{ F(\theta) - \sum_{p=0}^M \exp \left[ \frac{1}{N} i2kdm_{n,p} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right\}^2 \frac{1}{N_B} - F1(\theta)^2 \right\rangle^{1/2}. \quad (3)$$

Алгоритмический процесс заканчивается седьмым шагом, в ходе которого для разного количества дефектных ФВ по (2) для определения функции направленности и (3) для вычисления СКО генерируются графические изображения нормированных ДН и их СКО.

Таким образом, соотношения (1)–(3) полностью формируют разработанный алгоритм, позволяющий определить основные электрические характеристики ВЩФАР, когда мощность не проходит в АЭ.

**Результаты моделирования алгоритма.** В соответствии с представленным алгоритмом построены графики исходных нормированных ДН, средних ДН при отключении ФВ, когда мощность не проходит в АЭ, и СКО этих ДН (рис. 1–8). Статистическое моделирование выполнено для случаев до 35 дефектных ФВ поэтапно через 5 ФВ из 50.

На рис. 1–4 изображены графики функции направленности при исправной работе ВЩФАР и после наступления неисправностей 5, 10, 20 и 30 ФВ, когда мощность не проходит в АЭ. На этих графиках сплошной линией представлены ДН при наступлении дефекта ФВ, пунктирной линией – при полностью исправной работе ВЩФАР.

На рис. 5–8 изображены СКО исходной функции направленности от ее средней при неисправности указанного количества ФВ, соответствующие графикам на рис. 1–4.

Графики на рис. 1–8 позволяют сделать следующие выводы. Как и в первом и втором вариантах, исходная нормированная функция направленности и ее средние значения при дефектах ФВ, когда мощность излучения не проходит в АЭ, остаются такими же; происходит

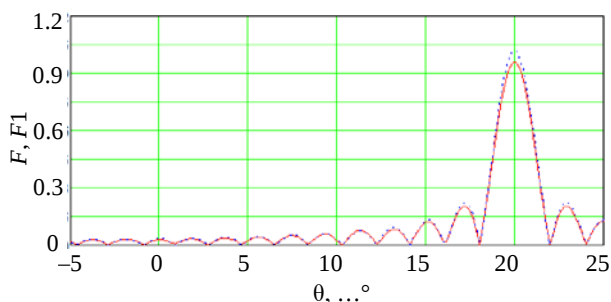


Рис. 1. Графики исходной (пунктир) и средней (сплошная) ДН при отказе 5 ФВ

Fig. 1. Graphs of initial (dotted line) and average (solid) RP with a failure of 5 PS

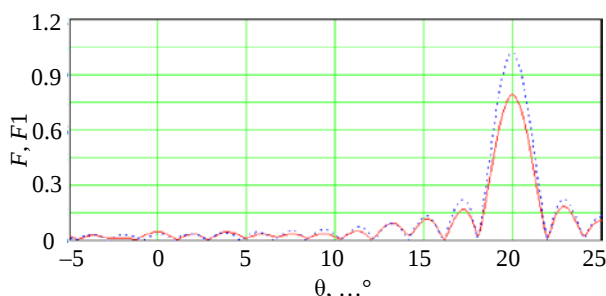


Рис. 2. Графики исходной (пунктир) и средней (сплошная) ДН при отказе 10 ФВ

Fig. 2. Graphs of initial (dotted line) and average (solid) RP with a failure of 10 PS

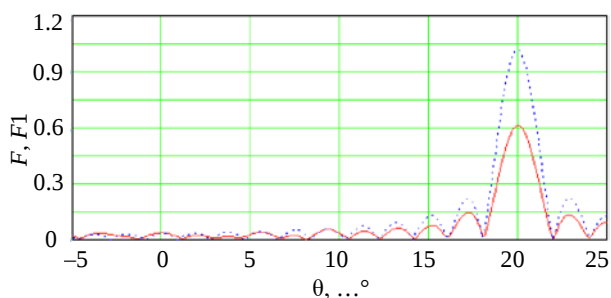


Рис. 3. Графики исходной (пунктир) и средней (сплошная) ДН при отказе 20 ФВ

Fig. 3. Graphs of initial (dotted line) and average (solid) RP with a failure of 20 PS

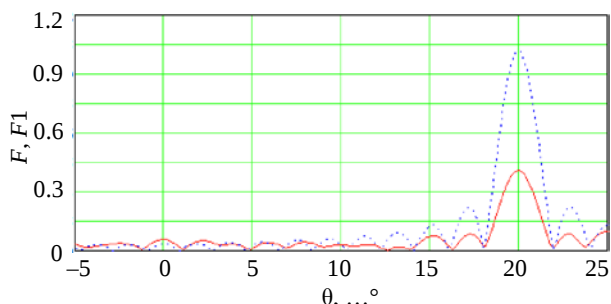


Рис. 4. Графики исходной (пунктир) и средней (сплошная) ДН при отказе 30 ФВ

Fig. 4. Graphs of initial (dotted line) and average (solid) RP with a failure of 30 PS

искривление формы главного максимума ДН так же, как и в первых двух вариантах; с увели-

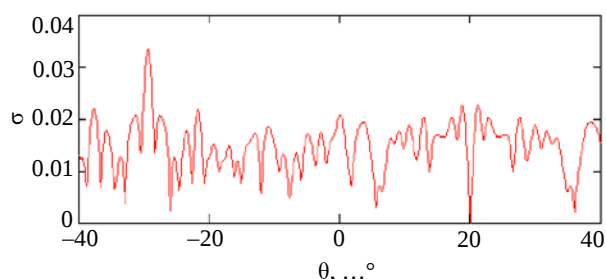


Рис. 5. График СКО ДН при отказе 5 ФВ

Fig. 5. Graph of SD of RP for failure of 5 PS

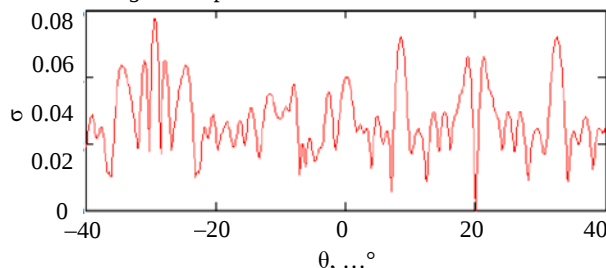


Рис. 6. График СКО ДН при отказе 10 ФВ

Fig. 6. Graph of SD of RP for failure of 10 PS

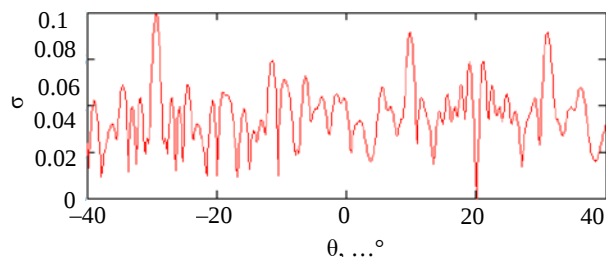


Рис. 7. График СКО ДН при отказе 20 ФВ

Fig. 7. Graph of SD of RP for failure of 20 PS

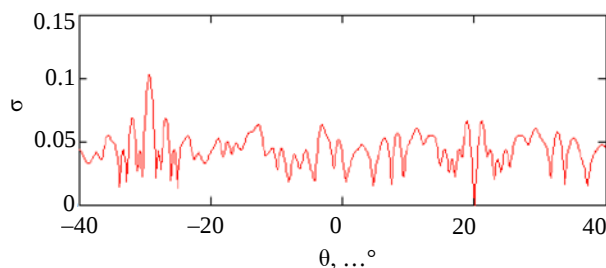


Рис. 8. График СКО ДН при отказе 30 ФВ

Fig. 8. Graph of SD of RP for failure of 30 PS

чением количества дефектных ФВ уменьшается относительная излучаемая мощность от 90 до 30 %; второй максимум нормированной функции направленности не появляется; при наступлении неисправностей провалы функции направленности отсутствуют; относительный УБЛ растет с 14 до 78 %; относительная ШДН увеличивается с 8 до 30 %; СКО увеличивается с 0.056 до 0.12.

Все результаты моделирования отказов ФВ сведены в табл. 3, где представлены результаты исследования 50-элементной ВЦФАР при неисправностях до 35 ФВ АЭ.

Табл. 3. Результаты моделирования отказов ФВ для третьего варианта

Tab. 3. Simulation results of phase shifter failures for the third option

| Параметр                            | Количество неисправных ФВ |       |       |      |     |      |      |
|-------------------------------------|---------------------------|-------|-------|------|-----|------|------|
|                                     | 5                         | 10    | 15    | 20   | 25  | 30   | 35   |
| Относительный УБЛ, %                | 14                        | 29    | 40    | 44   | 60  | 67   | 78   |
| Относительная ШДН, %                | 8                         | 12    | 14    | 15   | 19  | 23   | 30   |
| Мощность излучения в $\theta_0$ , % | 0.9                       | 0.82  | 0.71  | 0.6  | 0.5 | 0.43 | 0.3  |
| СКО                                 | 0.056                     | 0.061 | 0.079 | 0.09 | 0.1 | 0.11 | 0.12 |

**Оценка состояния ВЦФАР.** Обобщение и анализ алгоритмов моделирования неисправностей ФВ АЭ ВЦФАР показывает следующие результаты для всех трех вариантов: основной лепесток функции направленности расширяется, и уменьшается его максимальное значение; УБЛ увеличивается с образованием общего фона негативного бокового излучения; в соответствии с изменениями ДН происходят изменения во времени всех электрических характеристик ВЦФАР. Следует также отметить, что влияние дефектных ФВ во всех трех вариантах определяется местоположением АЭ на раскрытие ВЦФАР.

На рис. 9–12 представлены сравнительные графики зависимостей УБЛ ДН, ШДН ( $2\Delta\theta$ ), мощности излучения ( $P_{\text{изл}}$ ) в направлении главного максимума, СКО ДН, соответственно, от количества неисправных фазовращателей для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей.

Для оценки состояний ВЦФАР при эксплуатации, когда ее состояние оценивается по количеству дефектных ФВ АЭ, необходимо сформировать функциональные взаимозависимости электрических характеристик и количества неисправных ФВ АЭ. При этом АЭ считается неисправным с любым из трех вариантов дефекта ФВ АЭ.

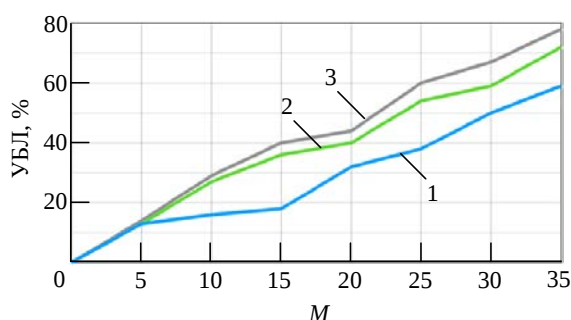


Рис. 9. Графики зависимостей УБЛ ДН от количества неисправных ФВ для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей  
Fig. 9. Dependence of the SLL RP on the number of faulty PS for 1, 2, and 3 fault variants

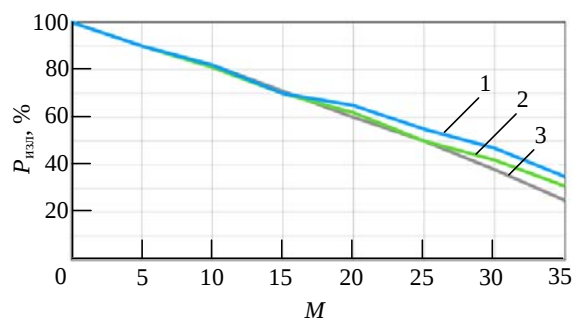


Рис. 11. Графики зависимостей мощности излучения в направлении главного максимума ДН от количества неисправных ФВ для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей  
Fig. 11. Dependencies of radiation power in the direction of the main maximum RP on the number of faulty PS for 1, 2, and 3 fault variants

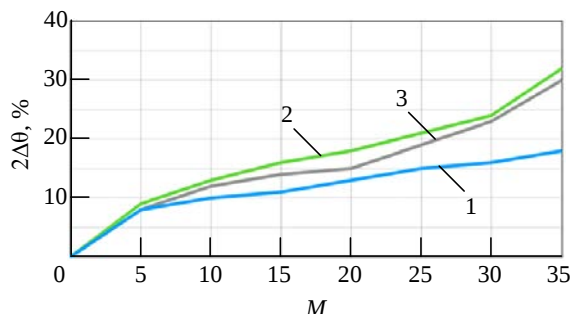


Рис. 10. Графики зависимостей ШДН от количества неисправных ФВ для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей

Fig. 10. Dependence of the RP width on the number of faulty PS for 1, 2, and 3 fault variants

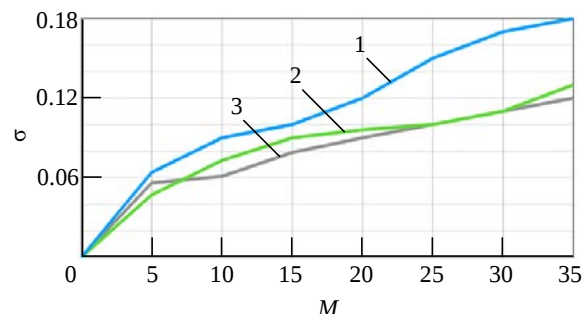


Рис. 12. График зависимости СКО ДН в зависимости от количества неисправных ФВ для 1, 2 и 3-го вариантов неисправностей

Fig. 12. Dependence of the SD of the RP on the number of faulty PS for 1, 2, and 3 fault variants

Табл. 4. Количество отказов ФВ  
для оценки состояния ВЦФАР

Tab. 4. Number of PS failures  
for assessing WSPAA operation

| Количество отказов ФВ                   | Вариант | Параметр |     |                  |
|-----------------------------------------|---------|----------|-----|------------------|
|                                         |         | ШДН      | УБЛ | $P_{\text{отн}}$ |
| при котором параметр изменяется на 20 % | 1       | –        | 16  | 11               |
|                                         | 2       | 23       | 7   | 10               |
|                                         | 3       | 26       | 7   | 10               |
| при котором параметр изменяется на 30 % | 1       | –        | 19  | 17               |
|                                         | 2       | 33       | 12  | 14               |
|                                         | 3       | 35       | 13  | 14               |

Оценка состояния антенной системы осуществляется путем измерения основных параметров. В сложных ВЦФАР имеется система контроля, которая позволяет установить число отказавших элементов и их координаты.

По количеству отказавших элементов можно приблизительно оценить изменение выходных параметров, однако система контроля ВЦФАР не позволяет обнаружить механические повреждения, такие как перекосы арматуры, смещение облучателей и др. Поэтому основным методом оценки состояния антенных систем является экспериментальный. На позиции без демонтажа антенны возможно измерить ДН, коэффициент усиления, поляризационные диаграммы, коэффициент стоячей волны волнового тракта, смещение равносигнального направления. Оценка состояния антенной системы осуществляется сравнением измеренных параметров исправной и настроенной антенны с параметрами, измеренными при данном состоянии.

Определим диапазон состояний системы при наступлении отказов ФВ: нормальная работа системы будет происходить при ухудшении параметров в диапазоне от 0 до 20 %; значение "ухудшение параметров" – в диапазоне от 20 до 30 % и, соответственно, "отказ" – при ухудшении параметров более 30 %. Количество отказов ФВ, соответствующее этим значениям, сведено

Табл. 5. Диапазон состояний ВЦФАР  
при наступлении отказов ФВ

Tab. 5. WSPAA operation states  
upon occurrence of PS failures

| Состояние ВЦФАР      | Количество неисправных ФВ |
|----------------------|---------------------------|
| Нормальная работа    | 0...7 неисправных ФВ      |
| Ухудшение параметров | 7...12 неисправных ФВ     |
| Отказ                | Более 12 неисправных ФВ   |

в табл. 4, где по горизонтали указаны параметры, ухудшение которых происходит, а по вертикали отложено значение изменения параметра для каждого варианта отказа.

В табл. 4 знак "–" означает, что данное значение ухудшения параметра наступает при отказе более, чем 35 ФВ.

Таким образом, получим диапазон состояний ВЦФАР при наступлении отказов ФВ, сведенный в табл. 5.

Получив соответствие между состоянием системы и количеством неисправных ФВ, можно провести их эксплуатационный контроль.

**Заключение.** В настоящей статье разработан алгоритм влияния неисправностей ФВ на электрические характеристики ВЦФАР при полном выключении ФВ из высокочастотного тракта. Приведен сравнительный анализ результатов данной работы с результатами, полученными в [28–30]. Всего проводилось моделирование 3 видов неисправностей, при которых устанавливались следующие параметры ФВ: фаза принимала значение, равное 0, вместо требуемого; фаза принимала случайное значение с учетом дискрета ФВ вместо требуемого; происходил отказ при полном выключении ФВ из работы. Были получены результаты оценки состояния ВЦФАР при указанных неисправностях, которые могут быть использованы в РЭС на этапе их разработки. Исследования неисправностей и оценки состояния ВЦФАР в статье проводились с помощью прикладного математического пакета Mathcad 15.

Дальнейшие направления исследований могут быть направлены на разработку методики эксплуатационного контроля состояния антенных систем, а также исследование компенсации искажений характеристик при их неисправностях.

## Список литературы

1. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев; под ред. Д. И. Воскресенского. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.

2. Воскресенский Д. И., Котов Ю. В., Овчинникова Е. В. Тенденции развития широкополосных фазированных антенных решеток (обзор работ) // Антенны. 2005. № 11 (102). С. 7–21.

3. Григорьев Л. Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М.: Радиотехника, 2010. 144 с.
4. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки. 2-е изд. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
5. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd ed. N. J.: John Wiley & Sons, 2005. 1136 p.
6. Мануилов М. Б., Лерер В. А., Синявский Г. П. Методы расчета и новые применения волноводно-щелевых антенных решеток // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 5. С. 3–28.
7. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Разработка линейной эквивалентной волноводно-щелевой антенной решетки и анализ ее направленных свойств // Антенны. 2018. № 2. С. 15–20.
8. Milligan T. A. Modern Antenna design. N. J.: John Wiley & Sons, 2005. 630 p.
9. Levin B. Antenna Engineering Theory and Problems. Boca Raton: CRC Press, 2017. 406 p.
10. Пелевин А. О., Заргано Г. В., Вяткина С. В. Сравнительный анализ ФАР на прямоугольных и гребневых волноводах // Телекоммуникации. 2019. № 3. С. 22–28.
11. Single ridge waveguide slot incremental conductance analysis and array antenna design / Rui Xu, Jiangying Li, Dingyi Luo, Guangwei Yang // Proc. of 2014 3<sup>rd</sup> Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation, Harbin, China, 26–29 July 2014. IEEE, 2014. P. 143–146. doi: 10.1109/APCAP.2014.6992435
12. Teng Li, Wenbin Dou. Design of an Edge Slotted Waveguide Antenna Array Based on T-Shaped Cross-Section Waveguide // Intern. J. of Antennas and Propagation. 2017. P. 1–8. doi: 10.1155/2017/7385357
13. Elliott R. S. Antenna Theory & Design. Wiley-IEEE Press, 2003. 612 p.
14. Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по частоте-поляризации / Д. Д. Габриэльян, А. Е. Коровкин, С. И. Бойчук, С. В. Дворников, М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-4-41-51
15. Пономарев Л. И., Степаненко В. И. Сканирующие многочастотные совмещенные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2009. 328 с.
16. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. М.: Сайнс-пресс, 2001. 232 с.
17. Bozzi M., Georgiadis A., Wu K. Review of Substrate Integrated Waveguide (SIW) Circuits and Antennas // IET Microwaves, Antennas and Propagation. 2011. Vol. 5, № 8. P. 909–920. doi: 10.1049/iet-map.2010.0463
18. Пастернак Ю. Г. Разработка антенной решетки для мобильного терминала спутниковой связи. URL: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/211/itogovyy-otchet-po-proektu-razrabotka-antennoy-reshetki-dlya-mobilnogo-terminala-sputnikovoy-svyazi.pdf> (дата обращения 06.05.2024).
19. Прокис Дж. Цифровая связь / пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь. 2000. 800 с.
20. Манаенко С. С., Дворников С. В., Пшеничников А. В. Теоретические аспекты формирования сигнальных конструкций сложной структуры // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21, № 1. С. 68–94. doi: 10.15622/ia.2022.21.3
21. Анализ потерь помехоустойчивости в условиях медленных замираний / А. А. Русин, М. Р. Бибарсов, Б. А. Аюков, Д. Ю. Гордиенко, С. А. Лященко, С. В. Дворников, А. А. Устинов // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2022. № 1. С. 81–85.
22. Теоретические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами / С. В. Дворников, А. В. Пшеничников, А. Ф. Крячко, М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-6-15
23. Научно-технические предложения по повышению помехоустойчивости приема многопозиционных сигналов в каналах с переменными параметрами / М. Р. Бибарсов, С. В. Дворников, А. Ф. Крячко, А. В. Пшеничников // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-6-15
24. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио, 1970. 384 с.
25. Синтез амплитудно-фазового распределения в квазиколецевой антенной решетке / М. Р. Бибарсов, Е. В. Грибанов, Д. Д. Габриэльян, Ден. С. Федоров, Дан. С. Федоров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. Вып. 2. С. 28–33.
26. Влияние локально плоских искажений излучающего раскрыва на диаграмму направленности фазированной антенной решетки / М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова, Д. Д. Габриэльян, С. В. Дворников, Д. С. Федоров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 17–25. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-17-25
27. Влияние ошибок формирования амплитудно-фазового распределения в раскрыве фазированной антенной решетки на точность пеленгации / М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова, Д. Д. Габриэльян, В. Н. Шацкий // Информация и космос. 2023. № 2. С. 18–23.
28. Бибарсов М. Р. Исследование влияния отказов фазовращателей на характеристики волноводно-щелевой фазированной антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 57–66. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-57-66
29. Синтез алгоритма оценки характеристик волноводно-щелевой антенной решетки при изменении фазировки антенных элементов / А. Ф. Крячко, Н. А. Гладкий, М. Р. Бибарсов, Б. А. Аюков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 3. С. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-42-51
30. Крячко А. Ф., Бибарсов М. Р., Аюков Б. А. Алгоритм моделирования изменения характеристик волноводно-щелевой антенной решетки при неисправностях фазовращателей // Тр. междунар. симп. "Надежность и качество", Пенза, 27 мая – 1 июня 2024 / Пензенский гос. ун-т. 2024. Т. 2. С. 472–474.

### Информация об авторах

**Бибарсов Марат Рашидович** – кандидат технических наук (1999), доцент (2007), старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 197 научных работ. Сфера научных интересов – системы передачи и приема информации; адаптивные антенные системы.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: Bibarsovmr@rambler.ru

**Крячко Александр Федотович** – доктор технических наук (2005), профессор (2008), заведующий кафедрой радиосвязи радиотехнических и оптоэлектронных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 201 научной работы. Сфера научных интересов – прикладная электродинамика; анализ и разработка управляющих информационных комплексов авиакосмических радиосистем телеметрии, связи и управления.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: kaf21@guar.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6886-5604>

**Пшеничников Александр Викторович** – доктор технических наук (2018), профессор (2022), начальник кафедры радиосвязи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 141 научной работы. Сфера научных интересов – радиотехника; системы передачи и приема информации; сигнально-кодовые конструкции.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: practicsv@yandex.ru

### References

1. Voskresensky D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Ustrojstva SVCh i anten* [Microwave Devices and Antennas]. Ed. by D. I. Voskresensky. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, *Radiotekhnika*, 2006, 376 p. (In Russ.)
2. Voskresensky D. I., Kotov Yu. V., Ovchinnikova E. V. Trends in the Development of Broadband Phased Antenna Arrays (review of works). *Antenna*. 2005, no. 11 (102), pp. 7–21. (In Russ.)
3. Grigoriev L. N. *Cifrovoe formirovanie diagrammy napravlenosti v fazirovannykh antennykh reshetkakh* [Digital Beamforming in Phased Antenna Arrays]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2010, 144 p. (In Russ.)
4. Hansen R. S. *Phased Antenna Arrays*. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009, 551 p.
5. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 1136 p.
6. Manuilov M. B., Lerer V. A., Sinyavsky G. P. Methods of Simulation and New Design Concepts of Slotted-Waveguide Array Antennas. *Advances of Modern Radio Electronics*. 2007, no. 5, pp. 3–28. (In Russ.)
7. Koshkidko V. G., Migalin M. M. Design and Investigation of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna. *Antennas*. 2018, no. 2, pp. 15–20. (In Russ.)
8. Milligan T. A. *Modern Antenna Design*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 630 p.
9. Levin B. *Antenna Engineering Theory and Problems*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 406 p.
10. Pelevin A. O., Zargano G. V., Vyatkinsa S. V. Comparative Analysis of Radiation Patterns of Phased Arrays of Slotted Rectangular and Single-Ridge Waveguide Antennas. *Telecommunications*. 2019, no. 3, pp. 22–28. (In Russ.)
11. Rui Xu, Jiangying Li, Dingyi Luo, Guangwei Yang. Single Ridge Waveguide Slot Incremental Conductance Analysis and Array Antenna Design. *Proc. of 2014 3<sup>rd</sup> Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation*, Harbin, China, 26–29 July 2014. IEEE, 2014, pp. 143–146. doi: 10.1109/APCAP.2014.6992435
12. Teng Li, Wenbin Dou. Design of an Edge Slotted Waveguide Antenna Array Based on T-Shaped Cross-Section Waveguide. *Intern. J. of Antennas and Propagation*. 2017, pp. 1–8. doi: 10.1155/2017/7385357
13. Elliott R. S. *Antenna Theory & Design*. Wiley-IEEE Press, 2003, 612 p.
14. Gabriel'ean D. D., Korovkin A. E., Boychuk S. I., Dvornikov S. V., Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh. Mathematical Model of an Antenna-Waveguide Path with Separation of Signals by Frequency-Polarization. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-4-41-51 (In Russ.)
15. Ponomarev L. I., Stepanenko V. I. *Skaniruyushchie mnogochastotnye sovmeshchennye antennye reshetki* [Scanning Multi-Frequency Combined Antenna Arrays]. Moscow, Radio engineering, 2009, 328 p. (In Russ.)
16. Vendik O. G., Parnes M. D. [Antennы s elektricheskimi skanirovaniem] *Antennas with Electrical Scanning*. Moscow, Science Press, 2001, 232 p. (In Russ.)
17. Bozzi M., Georgiadis A., Wu K. Review of Substrate Integrated Waveguide (SIW) Circuits and Antennas. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. 2011, vol. 5, no. 8, pp. 909–920. doi: 10.1049/iet-map.2010.0463
18. Pasternak Yu. G. Development of an Antenna Array for a Mobile Satellite Communication Terminal. Available at: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/211/itogovyy-otchet-po-proektu-razrabotka-antennay-reshetki-dlya-mobilnogo-terminala-sputnikovoy-svyazi.pdf> (accessed 06.05.2024).

19. Proakis J. Digital Communication. New York, McGraw-Hill, 2000, 905 p.
20. Manaenko S. S., Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V. Theoretical Aspects in Forming Complex Structure Signal. Informatics and Automation. 2022, vol. 21, no. 1, pp. 68–94. doi: 10.15622/ia.2022.21.3
21. Rusin A. A., Bibarsov M. R., Ayukov B. A., Gordienko D. Yu., Lyashchenko S. A., Dvornikov S. V., Ustinov A. A. Analysis of Immunity Losses Under Slow Fading. Radio Electronics Issues. The TV Technique Series. 2022, no. 1, pp. 81–85. (In Russ.)
22. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Kryachko A. F., Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh. Theoretical Proposals for Improving the Noise Immunity of Receiving Multi-Position Signals in Channels with Variable Parameters. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-6-15 (In Russ.)
23. Bibarsov M. R., Dvornikov S. V., Kryachko A. F., Pshenichnikov A. V. Scientific and Technical Proposals for Improving the Noise Immunity of Receiving Multi-Position Signals in Channels with Variable Parameters. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-6-15 (In Russ.)
24. Shifrin Y. S. [Voprosy statisticheskoi teorii antenn] Questions of statistical theory of antennas. Moscow, Sov. radio, 1970, 384 p. (In Russ.)
25. Bibarsov M. R., Gribanov E. V., Gabrielyan D. D., Fedorov Den. S., Fedorov Dan. S. Synthesis of Amplitude-Phase Distribution in Quasiconcave an Antenna Array. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, iss. 2. pp. 28–33. (In Russ.)
26. Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh., Gabrielyan D. D., Dvornikov S. V., Fedorov D. S. Effect of Locally Flat Distortions in the Radiating Aperture on the Radiation Pattern of a Phased Antenna Array. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 17–25. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-17-25 (In Russ.)
27. Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh., Gabrielyan D. D., Shatsky V. N. Influence of Errors in the Formation of the Amplitude-Phase Distribution in the Aperture of a Phased Array Antenna on the Accuracy of Direction Finding. Information and Space. 2023, no. 2, pp. 18–23.
28. Bibarsov M. R. Research into the Impact of Phase Shifter Failures on the Characteristics of Slotted Waveguide Array Antenna. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 1. pp. 57–66. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-57-66 (In Russ.)
29. Kryachko A. F., Gladkiy N. A., Bibarsov M. R., Ayukov B. A. Algorithm for Assessing the Characteristics of a Waveguide Slot Antenna Array when Changing Antenna Element Phasing. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 42–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-42-51 (In Russ.)
30. Kryachko A. F., Bibarsov M. R., Ayukov B. A. Algorithm for Modeling Changes in the Characteristics of a Waveguide-Slot Antenna Array in Case of Phase Shifter Failures. Proc. of the Intern. Symp. "Reliability and Quality", Penza, 27 May – 1 June 2024. Penza State University, 2024, vol. 2, pp. 472–474. (In Russ.)

### Information about the authors

**Marat R. Bibarsov**, Cand. Sci. (Eng.) (1999), Associate Professor (2007), Senior Lecturer of the Radio Communications Department of the Military Telecommunications Academy, Associate Professor of the Department of Radio-engineering and Optoelectronic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 197 scientific publications. Area of expertise: information transmission and reception systems; adaptive antenna systems. Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia  
E-mail: bibarsovmr@rambler.ru

**Alexander F. Kryachko**, Dr Sci. (Eng.) (2005), Professor (2008), Head of the Department of Radio-engineering and Optoelectronic Complexes of the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 201 scientific publications. Area of expertise: applied electrodynamics; analysis and development of control information complexes for aerospace radio telemetry, communication and control systems. Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia  
E-mail: kaf21@guap.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6886-5604>

**Alexander V. Pshenichnikov**, Dr Sci. (Eng.) (2018), Professor (2022), Head of the Department of the Radio Communication Department of the Military Telecommunications Academy. The author of 141 scientific publications. Area of expertise: radio technology; information transmission and reception systems; signal-code structures. Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia  
E-mail: practicsv@yandex.ru

## Оценка энергетической скрытности РЛС с пространственно-временной модуляцией зондирующего сигнала

В. М. Кутузов<sup>✉</sup>, В. П. Ипатов, С. С. Соколов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [vmkutuzov@etu.ru](mailto:vmkutuzov@etu.ru)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время вопросам незаметной работы радиолокационных систем различного назначения уделяется повышенное внимание. В статье рассматривается возможность повышения энергетической скрытности РЛС со сложным квазинепрерывным сигналом за счет дополнительной пространственной модуляции зондирующего сигнала в режиме излучения и использования технологии ММО (multiple-input and multiple-output) при приеме и обработке отраженных сигналов.

**Цель работы.** Исследование и сопоставительный анализ энергетической скрытности работы РЛС с пространственно-временной модуляцией зондирующего сигнала с троичной амплитудно-фазовой модуляцией на основе псевдослучайной последовательности максимальной длины.

**Материалы и методы.** Анализ энергетической скрытности базируется на теории сигналов в части, касающейся вопросов формирования и обработки сложномодулированных фазокодовых сигналов с большой базой. В качестве объекта исследований выбран квазинепрерывный троичный сигнал на основе псевдослучайной последовательности максимальной длины и регулярной импульсной последовательности, обеспечивающей развязку приема и передачи при использовании единой приемопередающей фазированной антенной решетки (ФАР). В качестве базы для сравнения берется аналогичная РЛС с таким же зондирующим сигналом и идентичной  $N$ -элементной ФАР без дополнительной пространственной модуляции. Для исключения энергетических потерь при приеме и обработке отраженных сигналов в РЛС с дополнительной пространственной модуляцией в работе предложено использовать технологию ММО.

**Результаты.** Получены количественные оценки выигрыша в уровне сигнала, накапливаемого в интегрирующих фильтрах энергетического приемника, при различных длительностях времени накопления, соизмеримых с периодом или временем когерентной обработки зондирующего сигнала РЛС. Анализ выполнен для случаев известной и неизвестной на стороне энергетического приемника несущей частоты сигнала РЛС. Отдельно проанализировано влияние отклонения диаграммы направленности ФАР от направления на носитель энергетического приемника. Преимуществом предложенного метода пространственной модуляции сигнала на основе псевдослучайной последовательности, обладающей свойством аддитивно-циклического сдвига, является отсутствие трансформации функции неопределенности, гарантирующее сохранение его корреляционных свойств.

**Заключение.** Полученные теоретические результаты и результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о повышении скрытности работы РЛС за счет дополнительной пространственной модуляции зондирующего сигнала. Применение технологии ММО позволило избежать энергетических потерь при приеме и обработке отраженных сигналов в приемнике РЛС.

**Ключевые слова:** троичный амплитудно-фазоманипулированный сигнал, псевдослучайная последовательность максимальной длины, технология ММО, пространственно-временная модуляция

**Для цитирования:** Кутузов В. М., Ипатов В. П., Соколов С. С. Оценка энергетической скрытности РЛС с пространственно-временной модуляцией зондирующего сигнала // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 30–43. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-30-43

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024; принята к публикации после рецензирования 15.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

## Energy Stealth Evaluation of Radar Systems with a Space-Time Modulated Probing Signal

Vladimir M. Kutuzov✉, Valery P. Ipatov, Sergey S. Sokolov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ vmkutuzov@etu.ru

### Abstract

**Introduction.** Increased attention is currently paid to the issues of stealth operation of various radar systems. The article considers the possibility of increasing the energy stealth of a radar system with a complex quasi-continuous signal due to additional spatial modulation of the probing signal in the radiation mode and the use of MIMO technology when receiving and processing reflected signals.

**Aim.** Research and comparative analysis of the energy stealth of a radar system with a space-time modulated probing signal with ternary amplitude-phase modulation based on a pseudo-random sequence of maximum length.

**Materials and methods.** The analysis of energy stealth is based on the theory of signals concerning the issues of formation and processing of complex modulated phase-code signals with a large base. A quasi-continuous ternary signal based on a pseudo-random sequence of maximum length and a regular pulse sequence providing decoupling of reception and transmission when using a single transceiver phased array was selected as a research object. A similar radar system with the same probing signal and identical  $N$ -element phased array without additional spatial modulation was used as a reference. In order to eliminate energy losses during reception and processing of reflected signals in the radar system with additional spatial modulation, MIMO technology was used.

**Results.** Quantitative estimates of the gain in the signal level accumulated in the integrating filters of the power receiver for different accumulation time durations commensurate with the period or time of coherent processing of the radar probing signal were obtained. The cases of known and unknown carrier frequencies of the radar signal on the side of the power receiver were analyzed. In addition, the effect of the deviation of the phased array pattern from the direction to the carrier of the power receiver was analyzed. The advantage of the proposed method of spatial modulation of a signal based on a pseudo-random sequence with the property of an additive cyclic shift consists in the absence of transformation of the uncertainty function, which ensures the preservation of its correlation properties.

**Conclusion.** The obtained theoretical and simulation results indicate an improved stealth of radar operation due to additional spatial modulation of the probing signal. The use of MIMO technology allowed energy losses during the reception and processing of reflected signals in the radar receiver to be eliminated.

**Keywords:** ternary amplitude-phase-shift keyed signal, pseudo-random sequence of maximum length, MIMO technology, space-time modulation

**For citation:** Kutuzov V. M., Ipatov V. P., Sokolov S. S. Energy Stealth Evaluation of Radar Systems with a Space-Time Modulated Probing Signal. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 30–43. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-30-43

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 02.10.2024; accepted 15.11.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Основной характеристикой традиционных обзорных РЛС является рабочая зона, или зона ответственности, в пределах которой радиолокатор выполняет свои функции с требуемыми вероятностными характеристиками при обнаружении целей с заданными характери-

стиками [1]. Если к РЛС предъявляются требования по скрытности, дополнительно оговаривается область пространства или зона скрытной работы, в пределах которой факт работы ее передатчика не может быть зафиксирован (обнаружен) средствами радиотехнической разведки (ПТР). В та-

ких случаях говорят об энергетической скрытности [2]. Скрытная РЛС тем эффективнее, чем больше разница между границей зоны ответственности и границей зоны скрытной работы.

Кроме энергетической в радиолокационной практике используется информационная скрытность, которая предполагает невозможность определения средствами радиоразведки основных параметров сигнала, таких, как несущая частота, вид и параметры модуляции зондирующего сигнала. Очевидно, что обеспечение энергетической скрытности гарантирует информационную скрытность. В обоих случаях скрытность есть качество, важное в конфликтной ситуации противостояния РЛС и средств радиотехнической разведки. Иногда сравниваются временные интервалы, необходимые РЛС для обнаружения целей и разведприемнику для обнаружения сигнала передатчика и оценки его параметров.

Далее в статье рассматривается энергетическая скрытность при сопоставимых временах анализа сигналов в когерентных РЛС и средствах радиотехнического наблюдения, реализованных в виде энергетических приемников (ЭП) радиомониторинга [3, 4]. Методика инженерного расчета оценки энергетической скрытности сложного сигнала с большой базой подробно рассмотрена в [5] в приложении к системам широкополосной связи. Эта методика применима и в случае дуэльной ситуации обнаружения носителя ЭП когерентной РЛС со сложным зондирующим сигналом с большой базой, однако в данном случае представляет интерес не абсолютное значение параметров скрытности, а относительный выигрыш за счет применения дополнительной пространственной модуляции, оцениваемый как снижение уровня сигнала, поступающего на вход ЭП.

Использование в скрытных РЛС широкополосных сигналов с большой базой позволяет равномерно распределять энергию зондирующего сигнала по времени и по спектру, что затрудняет обнаружение сигнала средствами РТР [5–7]. При этом на основные параметры зондирующего сигнала – время когерентной обработки (анализа)  $T_a$  и ширину его спектра  $\Delta F$ , определяющие его базу  $B = T_a \times \Delta F$ , накладываются ограничения физического, технологиче-

ского и тактико-технического характера, основные из которых приведены в [8]. Для повышения энергетической скрытности РЛС обычно используются сложно модулированные сигналы с дискретной фазокодовой модуляцией (ФКМ) и частотной модуляцией (ЧМ) с непрерывным или дискретным изменением частоты [9]. Хрестоматийными стали бинарные ФКМ-сигналы с противофазным переключением фазы на  $(0, \pi)$  по закону псевдослучайных последовательностей максимальной длины (М-ПСП) и линейные ЧМ (ЛЧМ)-, а также дискретные ЧМ (ДЧМ)-сигналы с различными законами переключения частоты, такими, как массивы Костаса [5, 6, 10–13].

**Цель работы.** В данной статье анализируется возможность повышения энергетической скрытности РЛС за счет использования пространственно-временной модуляции зондирующих ФКМ-сигналов низкой скважности на основе кодов, обладающих свойством аддитивно-циклического сдвига, таких, как М-ПСП. При этом предполагается, что приемопередающая фазированная антенная решетка (ФАР), обеспечивающая ортогональное разнесение во времени передачи и приема сигналов, состоит из  $N$  идентичных слабонаправленных в азимутальной плоскости антенных элементов (АЭ). В качестве базы для сравнения берется аналогичная РЛС с таким же ФКМ зондирующим сигналом на основе той же М-ПСП и такой же  $N$ -элементной ФАР, но без дополнительной пространственной модуляции.

**Исходные данные.** В качестве зондирующего рассмотрим троичный сигнал  $\{+1, -1, 0\}$ , структура которого в общем виде описана в [1]. Для развязки приемника и передатчика РЛС при работе на одну антенну используется бинарный сигнал  $\{1, 0\}$  в виде регулярной импульсной последовательности (РИП), характеризующийся длительностью  $\tau_{РИП}$  и периодом следования  $T_{РИП}$  импульсов РИП. Отношение  $T_{РИП}/\tau_{РИП}$  определяет скважность сигнала  $Q$  и его энергоемкость на интервале когерентного анализа  $T_a$ . Обозначим период сигнала как  $T$ , тогда отношение  $l = T/T_{РИП}$  определяет число импульсов РИП на периоде, а общее количество периодов сигнала, подлежащих когерентной обработке на интервале анализа  $T_a$ , определяется как  $L = T_a/T$ . При работе РЛС на од-

ну антенну минимальная скважность и максимальная энергоемкость излучаемого сигнала достигаются при  $Q = 2$ . Потери энергии принимаемого полезного сигнала за счет коммутации "прием–передача" по закону РИП определяются функцией приема, которая в общем виде имеет вид равнобедренной трапеции [1], возникающей в треугольник при  $Q = 2$ .

Для внутриимпульсной противофазной модуляции на  $(0, \pi)$  воспользуемся кодом  $Z(m)$  в виде М-ПСП  $\{+1, -1\}$  длиной  $M$  символов. Возможны 2 варианта заполнения импульсов РИП фазовым кодом. При первом в каждый импульс РИП вписывается целиком вся М-ПСП. Если обозначить временную длину чипа М-ПСП как  $\tau_0$ , то  $\tau_{\text{РИП}} = M\tau_0$  и  $T_{\text{РИП}} = MQ\tau_0$ , а период сигнала  $T = T_{\text{РИП}}$ . При этом максимальное число однозначно измеряемых элементов разрешения по дальности (задержке) равно  $M$ . Рабочая зона по задержке полезного сигнала  $\tau_{\text{max}}$  в этом случае равна  $\tau_{\text{max}} = M\tau_0$ . При скважности  $Q = 2$  средний уровень боковых лепестков (БЛ) автокорреляционной функции (АКФ) данного сигнала равен  $\gamma = 1/\sqrt{M}$ . При скважности  $Q > 2$   $\tau_{\text{max}} > M\tau_0$ , при этом для задержек  $\tau > \tau_{\text{РИП}}$  появляется зона с нулевым уровнем БЛ. Рабочая зона функции неопределенности (ФН) по доплеровскому сдвигу частоты  $f_D$  при первом варианте максимальна и ограничена величиной, обратной периоду  $T$ :  $f_{D\text{max}} = 1/T = 1/T_{\text{РИП}}$ .

Второй вариант заполнения предполагает размещение фазового кода в нескольких импульсах РИП. Впишем последовательные фрагменты фазового кода целочисленной длины  $k$  в импульсы РИП так, что  $k = \tau_{\text{РИП}}/\tau_0$ . Тогда для размещения всей М-ПСП потребуется  $K = M/k$  (с округлением в большую сторону) импульсов РИП. Далее в статье рассматривается второй вариант размещения фазового кода и  $Q = 2$ .

Рассмотрим РЛС, осуществляющую сканирование пространств в азимутальной плоскости. Для упрощения выкладок представим приемопередающую антенну в виде линейной одномерной ФАР с эквидистантным расположением  $N$  ненаправленных в передней полуплоскости АЭ с шагом  $d = \lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина несущей ра-

диоволны зондирующего сигнала. Это позволяет заменить в расчетах реальную диаграмму направленности (ДН) отдельных АЭ  $F_{\text{АЭ}}(\theta)$  в плоскости азимутальных углов  $\theta$  единичным множителем  $F_{\text{АЭ}}(\theta) = 1$  и оперировать в дальнейшем множителем решетки  $F_{\text{ФАР}}(\theta)$ .

Будем считать сигнал пространственно-узкополосным, что выполняется, если размер апертуры ФАР существенно меньше разрешения по дальности, обеспечиваемого шириной его спектра [14]. Будем также считать фронт волны отраженного сигнала плоским в пределах апертуры ФАР. Выполнение этих двух условий позволяет рассматривать временную и пространственную составляющие обработки сигналов независимо и в любом порядке, а сам пространственно-временной сигнал  $S(t, n)$  факторизовать в виде сомножителей, зависящих от временной  $s(t)$  и пространственной  $s(n)$  переменных:  $S(t, n) = s(t)s(n)$ .

**Методы и основные соотношения.** Запишем излучаемый  $n$ -м АЭ сигнал в виде комплексной гармоники:

$$s(t) = \dot{A}(t) \exp\{j(2\pi f_0 t - \varphi_n)\}, \quad (1)$$

где  $\dot{A}(t) = A(t) \exp\{j\Phi(t)\}$  – комплексная амплитуда зондирующего сигнала, определяемая законами амплитудной  $A(t)$   $(0, 1)$  и фазовой  $\Phi(t)$   $(0, \pi)$  манипуляции;  $j$  – мнимая единица;  $f_0$  – несущая частота;  $\varphi_n$  – начальная фаза. Временную составляющую отраженного от движущейся цели сигнала (1) можно представить в виде:

$$s(t) = \dot{A}(t - \tau) \exp\{j[2\pi(f_0 - f_D)(t - \tau) - \varphi_n]\}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – задержка отраженного сигнала;  $f_D$  – доплеровский сдвиг частоты. После выполнения в каждом пространственном канале согласованной обработки полезного сигнала со случайной фазой (2) отклик приемника с точностью до постоянного множителя будет определяться ФН  $\chi(\tau, f_D)$ , которая представима в виде [8]

$$\chi(\tau, f_D) = \frac{1}{2E} \left| \int_0^{T_a} A(t) A^*(t - \tau) \exp\{-j2\pi f_D t\} dt \right|, \quad (3)$$

где  $E$  – энергия сигнала. Звездочкой в (3) обозначено комплексное сопряжение. Далее удобно нормировать временные соотношения и параметры к  $\tau_0$ , что позволяет перейти к дискретному целочисленному времени  $m = t/\tau_0$ .

Совместим линию апертуры ФАР с осью  $x$  так, что первый АЭ будет расположен в начале координат. Запишем пространственную составляющую комплексного сигнала  $n$ -го АЭ в виде

$$s(n) = \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} d(n-1)(\sin \theta - \sin \theta_0)\right\} = \exp\{j\pi(n-1)(\sin \theta - \sin \theta_0)\}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – азимутальный угол, отсчитываемый от нормали к линии апертуры ФАР;  $\theta_0$  – угол отклонения главного лепестка ДН ФАР, которая с точностью до постоянного множителя будет определяться выражением [15]

$$F_{\text{ФАР}}(\theta) = \sum_{n=1}^N \exp\{j\pi(n-1)(\sin \theta - \sin \theta_0)\} = N \frac{\sin[N\pi(\sin \theta - \sin \theta_0)/2]}{N\pi(\sin \theta - \sin \theta_0)/2}. \quad (5)$$

Вначале рассмотрим случай, когда на каждый из  $N$  АЭ от передатчика поступает один и тот же когерентный амплитудно-фазоманипулированный сигнал (1) длительностью  $T_a$ , сформированный на основе  $K \times L$  импульсов РИП и вписанной в них по второму варианту М-ПСП  $Z(m)$ . Схематично один период зондирующего сигнала из нескольких импульсов РИП представлен на рис. 1 для М-ПСП длиной  $M$  и числе чипов в импульсе РИП  $k$  (верхний график). При  $m = (M+1)$  и  $k$ , кратным  $2^i$ , последний чип в периоде не определен и может быть записан как  $\pm 1$  или  $0$  (второй случай предпочтительней, если требуется сохранить уровень БЛ М-ПСП). Рабочая зона по

задержке отраженного сигнала при работе на одну антенну обычно определяется паузой между активными импульсами РИП и зависит от скважности последнего:  $\tau_{\max} = (Q-1)\tau_{\text{РИП}}$ . Для  $Q = 2$  это зона с максимальной задержкой  $\tau_{\max} = \tau_{\text{РИП}}$ , хотя зона однозначных измерений определяется периодом сигнала  $T = LT_{\text{РИП}}$  или  $(QM+1)$  элементарных чипов. Однако в этом диапазоне задержек нормированная функция приема  $W(\tau)$  как зависимость доли энергии принимаемого сигнала от задержки при работе на одну антенну имеет слепые зоны и для данного сигнала приведена на рис. 1 (нижний график). При скважности  $Q > 2$   $W(\tau)$  трансформируется в равнобедренную трапецию.

На рис. 2, *a* приведена нормированная АКФ представленного на рис. 1 сигнала при  $M = 511$ ,  $k = 64$  и  $Q = 2$ , а на рис. 2, *б* – его нормированная ФН в окрестности небольших сдвигов по задержке от  $0$  до  $\pm 25 \tau_0$ .

Как видно из графиков рис. 2, *a*, средний уровень БЛ АКФ сигнала в интервале задержек  $\tau < \pm T = 1024$  не превышает  $1/\sqrt{M}$ . В точках  $\tau = i\tau_{\text{РИП}}$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ) БЛ АКФ становятся равны  $0$ . При большей скважности ( $Q > 2$ ) точки с нулевым уровнем БЛ превращаются в зоны, определяемые вершиной трапецеидальной функции приема  $W(\tau)$  [8].

Сечение ФН по частотному сдвигу при  $\tau = 0$  определяется амплитудным спектром сигнала РИП, который имеет линейчатый характер с огибающей вида  $\sin x/x$ , первые нули которой находятся в точках  $f_D = 1/\tau_{\text{РИП}}$ , а спектральные линии шириной  $1/T_a$  расположены в точках, кратных  $f_D = 1/T_{\text{РИП}}$ . На

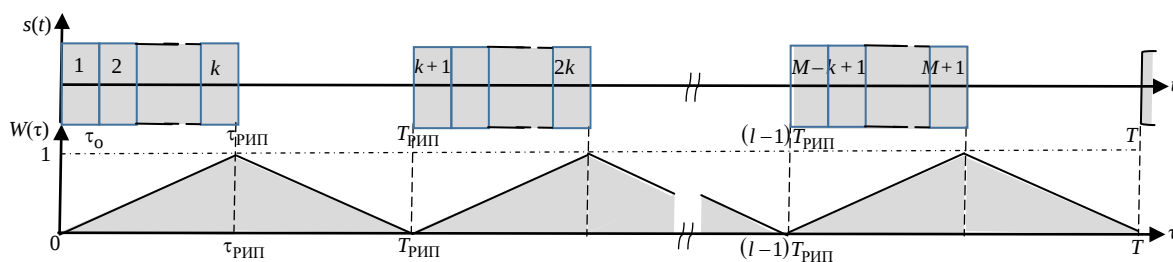


Рис. 1. Один период зондирующего сигнала и его функция приема

Fig. 1. One period of the probing signal and its receiving function

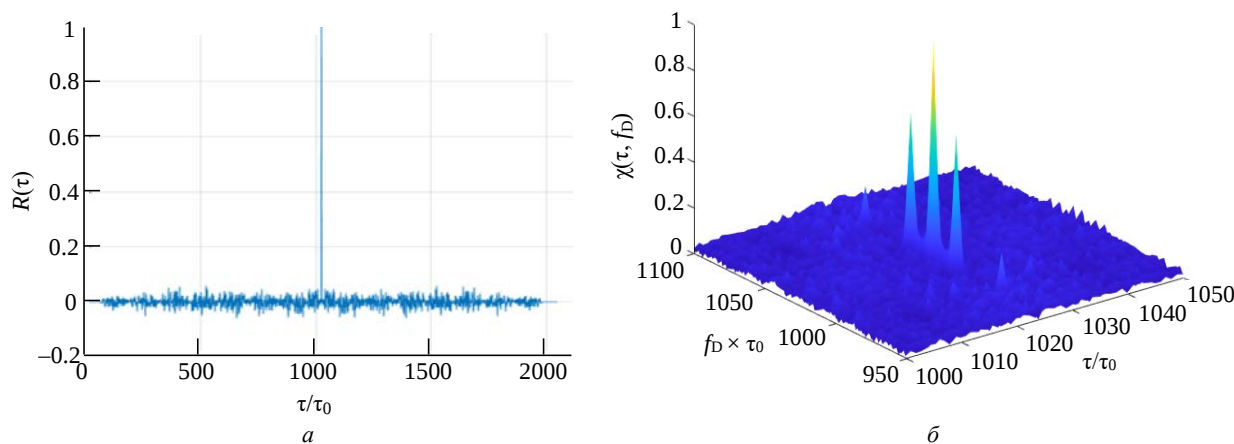


Рис. 2. Нормированная АКФ (а) и ФН (б) зондирующего сигнала

Fig. 2. Normalized ACF (a) and FN (b) of the probing signal

остальной плоскости при  $\tau \leq \tau_{\max} = k\tau_0$  и  $f_D \leq |1/T_{\text{РИП}}|$  средний уровень БЛ можно оценить как  $\gamma = 1/\sqrt{M}$ .

Рассмотрим сигнал, поступающий на антенну ЭП от одиночного АЭ ФАР вида (1). С точностью до множителя ослабления электромагнитного поля в пространстве [1] он будет зависеть от направления ДН в режиме передачи вида (4) на ЭП и уровня БЛ ФН (2). Очевидно, что максимальным сигнал будет при совпадении направления ДН РЛС и ДН ЭП. Логично предположить, что время анализа в ЭП не будет синхронизировано и совпадать с точностью до неизвестного априори периода сигнала РЛС. Это позволяет оценить относительный уровень накопления сигнала в ЭП по нормированным БЛ как

$$\gamma_0 \leq \frac{i}{M} + \frac{1}{\sqrt{M}}, \quad (6)$$

где  $i$  – число полных периодов накопленного в интегрирующем фильтре ЭП сигнала. Первое слагаемое в (6) максимально при  $i = L$ . Второе слагаемое характеризует накопление неполного периода сигнала, что соответствует уровню БЛ ФН усеченного сигнала, приведенного на рис. 1, а. В данном случае  $L$  существенно меньше  $\sqrt{M}$ , поэтому можно пренебречь первым слагаемым в силу его малости по сравнению со вторым и положить:

$$\gamma_0 \approx \frac{1}{\sqrt{M}}. \quad (7)$$

При излучении одинаковых сигналов всеми АЭ относительный уровень сигнала за счет когерентного сложения в ЭП увеличится по сравнению с (6) и (7) до значения:

$$\gamma_0 = \frac{NL}{M} + \frac{N}{\sqrt{M}} \approx N/\sqrt{M}, \quad (8)$$

а при отклонении луча ДН РЛС уровень сигнала будет падать пропорционально нормированной ДН ФАР  $\frac{1}{N} F_{\text{ФАР}}(\theta)$  вида (5):

$$\gamma_0(\theta) = \frac{1}{N} F_{\text{ФАР}}(\theta) \gamma_0. \quad (9)$$

Для получения реального значения уровня накапливаемого сигнала необходимо пользоваться БЛ ненормированной ФН, поэтому значения, приведенные в (6)–(9), следует умножить на длину М-ПМП  $M$ .

Для уменьшения уровня накапливаемого сигнала на входе ЭП можно ввести дополнительную пространственную модуляцию в суммарный излучаемый сигнал РЛС. В общем случае можно закодировать работу каждого АЭ ФАР своим кодом, как это делается в системах CDMA [5], однако в результате наблюдается трансформация корреляционных свойств сигнала, что не всегда приемлемо на практике. Кроме того, попутно возникает проблема сохранения коэффициента усиления приемопередающей ФАР. В традиционном режиме каждый АЭ принимает отраженные сигналы, излученные всеми АЭ, т. е.  $N$  элементарных сигналов вида (2), и суммирует их когерентно с учетом сдвига фаз при отклонении ДН ФАР. При кодо-

вом разделении пространственных каналов каждый антенный элемент принимает только "свой" отраженный сигнал, поэтому в известное уравнение радиолокации [8] следует подставлять коэффициент усиления ФАР  $G$ , а не его квадрат  $G^2$ , что в  $\sqrt[4]{G}$  уменьшает дальность действия РЛС.

**Результаты.** В данной статье рассматривается возможность использования дальномерной избыточности исходного сигнала, часто обусловленной не реальной необходимостью большого числа каналов измерения дальности, а желанием получить низкий уровень БЛ ФН за счет использования "длинных" кодов. Для этого необходимо выполнить условие равенства числа АЭ  $N$  и числа импульсов РИП  $K$ :  $N = K$ . Если это условие выполняется, то для каждого АЭ формируется свой сигнал, отличающийся от других задержкой модулирующей последовательности, причем сдвиг по задержке должен быть равен числу символов М-ПСП  $k$ , вписанных в каждый импульс РИП (в рассматриваемом примере  $k = 64$ ). Обозначим номер АЭ как  $n$ , тогда задержку модулирующей фазы М-ПСП  $Z[m - k(n - 1)]$  для АЭ $_n$  можно выразить через комплексную огибающую в выражении (1):

$$\dot{A}_n(t) = A(t) \exp \{ j\Phi[t - k\tau_o(n - 1)] \}.$$

Отметим, что изменения в сигналах отдельных АЭ касаются только задержки модулирующей М-ПСП, сам сигнал по высокой частоте остается когерентным в пределах ФАР. Упрощенная функциональная схема формирования пространственно-модулированного сложного

сигнала представлена на рис. 3.

Сигнал от задающего генератора (ЗГ) поступает в первый умножитель, который выполняет функции ключа, управляемого двоичным импульсным сигналом  $A(m)$  (0, 1) на основе РИП. Блок формирования ДН в режиме передачи в простейшем случае обеспечивает линейно нарастающее/убывающее фазирование сигналов АЭ в соответствии с заданным отклонением луча ДН на угол  $\theta_0$ , а сама ДН описывается выражением (5). Второй уровень умножителей обеспечивает квазиортогональное разделение сигналов отдельных АЭ за счет циклического сдвига на  $k$  символов модулирующей фазы М-ПСП  $Z(m)$ .

Формирование пространственно-модулированного сигнала в ФАР иллюстрирует рис. 4, в котором для наглядности приняты следующие параметры:  $M = 511$ ;  $k = 64$ ;  $Q = 2$  и  $N = K = 8$ . Для каждого из восьми АЭ $_n$  указаны номера чипов М-ПСП от 1 до 512 (чипу № 512 везде присваивается символ 0). Импульсы РИП для всех АЭ на рис. 4 пронумерованы римскими цифрами от I до VIII. Как видно из рис. 4, в каждом АЭ $_n$  сдвиг модулирующей фазы М-ПСП имеет свою задержку, кратную 64. Если рабочая зона РЛС по задержке (дальности) не превышает  $\tau_{\max} = 64\tau_o$ , то при любой задержке  $\tau \leq \tau_{\max}$  исключено перекрытие импульсов РИП с одинаковыми задержками М-ПСП. Это позволяет легко разделить сигналы в едином приемнике РЛС по задержкам модулирующей М-ПСП и организовать многоканальную по числу АЭ обработку отраженных сигналов.

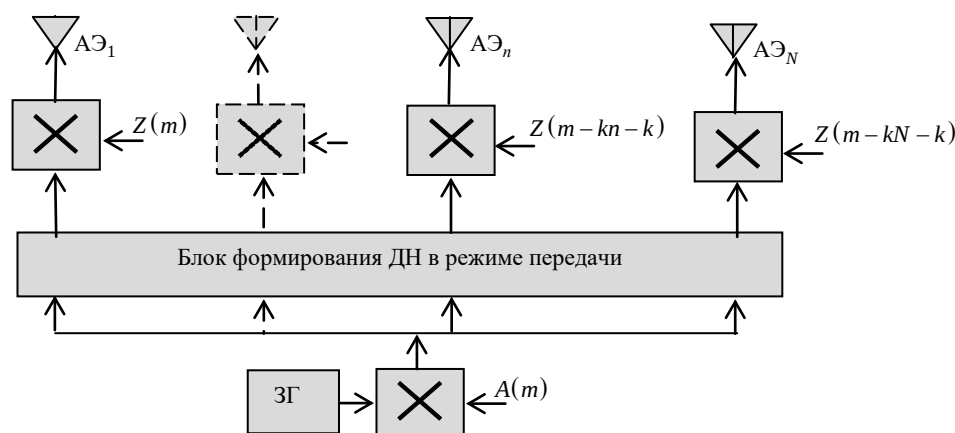


Рис. 3. Формирование ДН в режиме передачи

Fig. 3. Formation of the radiation pattern in transmission mode

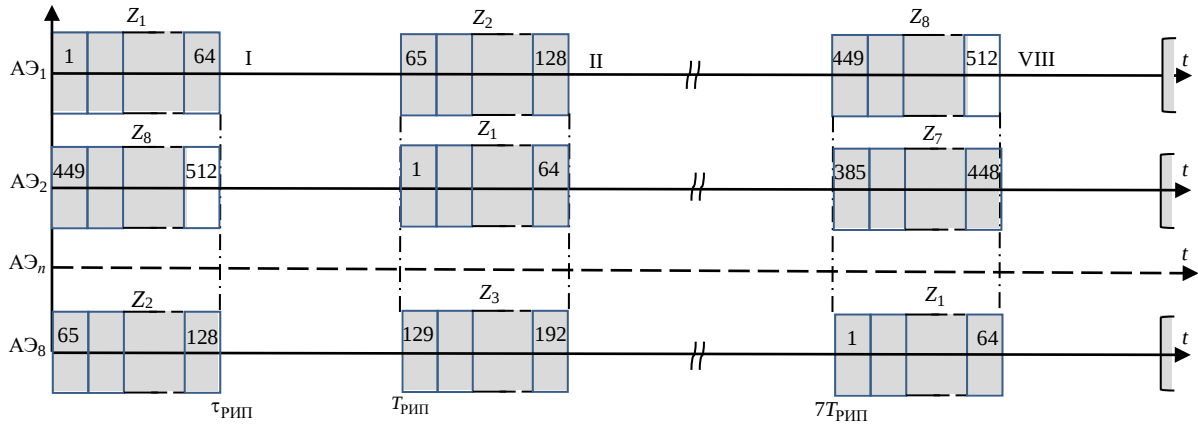


Рис. 4. Пространственно-временная структура зондирующего сигнала

Fig. 4. Spatial and temporal structure of the probing signal

Очевидным преимуществом такого решения является сохранение закона модуляции зондирующего сигнала, что не требует изменения структуры приемника (фильтра), согласованного с сигналом в каждом пространственном канале.

Если обозначить фрагменты первой М-ПСП  $Z(m)$ , ( $m = 1, 2, \dots, M$ ), вписанной в импульсы РИП от I до VIII, как некий вектор-строку  $Z(m) = [z_1, z_2, \dots, z_8]$ , то весь период сигнала на рис. 4 можно представить в виде квадратной матрицы размером  $8 \times 8$ :

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 & \dots & z_8 \\ z_8 & z_1 & \dots & z_7 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_2 & z_3 & \dots & z_1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Первая строка матрицы (10) образует исходную М-ПСП длиной  $M = 511$  с добавленным последним нулевым чипом. Остальные строки также образуют М-ПСП с нарастающим циклическим сдвигом, кратным  $k = 64$ . Что касается столбцов матрицы (10), то они также состоят из фрагментов М-ПСП, если их считать "снизу вверх". В этом случае последний столбец образует М-ПСП  $Z(m)$ , зеркальную исходной, а остальные – циклически сдвинутые последовательности, причем каждый сдвиг характерен только для одного столбца. Это означает, что в пределах периода сигнала накопление по строкам и по столбцам даст одинаковый результат, равный  $1/M$ . Накопление совокупного сигнала в пределах периода будет соответствовать значению  $N/M$ , что существенно меньше уровня (8). Из-

за свойств матрицы (10) накопление сигнала в пределах любого целого числа  $i$  импульсов РИП от 1 до  $l \times L$  можно оценить как  $\gamma_1 = N_i/M$ . Тогда в пределе при  $i = l \times L$   $\gamma_1 = Ll/M$  или при  $l = N$   $\gamma_1 = NL/M$ . Этот уровень будет справедлив при соизмеримых временах накопления в РЛС  $T_a$  и ЭП  $T_{ЭП}$ . Если  $T_{ЭП} \ll T_a$  и соизмеримо с периодом сигнала  $T$ , то уровень накопленного сигнала в ЭП при  $l = N$  будет пропорционален величине  $\gamma_1 = N/M$ , в то время как для обычной РЛС он вырастет пропорционально  $\gamma_0 = N/\sqrt{M}$ , т. е. в  $\sqrt{M}$  раз.

Если накопительный фильтр ЭП настроен не точно на несущую частоту зондирующего сигнала РЛС, формула (6) для пространственно-немодулированного сигнала не справедлива. Выражение (8) изменится и с учетом уровня БЛ ФН  $1/\sqrt{M}$  (см. рис. 2, б) при накоплении  $L$  периодов может быть оценено как  $\gamma_2 = LN/\sqrt{M}$ . При этом округление нецелых периодов не влияет на оценку уровня накопленного сигнала, поскольку для усеченного периода не изменятся средний уровень БЛ ФН.

Для сигнала с пространственной модуляцией (рис. 4) накопление сигналов отдельных АЭ также приведет к уровню  $\gamma_3 = L/\sqrt{M}$ , включая случай накопления неполного последнего периода. Для  $N$  пространственных каналов совокупный сигнал всех АЭ приведет к накоплению  $\gamma_3 = L\sqrt{N}/\sqrt{M}$ , так как БЛ от сигналов АЭ независимы и имеют одинаковый средний уро-

вень. Таким образом, выигрыш от пространственной модуляции сигнала составит  $\sqrt{N}$ , откуда следует вывод о целесообразности увеличения числа каналов пространственной модуляции зондирующего сигнала РЛС.

При отклонении ДН от направления на объект с ЭП для пространственно-модулированного сигнала уровень накопления в ЭП будет зависеть от азимутального угла  $\theta$  и определяться выражением

$$\gamma(\theta) = \sum_{n=1}^N \gamma_n \exp\{j\pi(n-1)\sin\theta\}, \quad (11)$$

где  $\gamma_n$  – фактически накопленный уровень БЛ сигнала от АЭ<sub>*n*</sub> в ЭП. Хотя средний уровень БЛ усеченной М-ПСП оценивается как  $1/\sqrt{M}$ , фактические значения в различных каналах приема могут отличаться друг от друга как по модулю, так и по знаку, поэтому выражение (9), справедливое для РЛС без пространственной модуляции сигнала, в этом случае не применимо. Матричное представление совокупного сигнала вида (10) позволяет рассматривать запись  $\gamma(\theta)$  в форме (11) как некий эквивалент БЛ при доплеровском сдвиге с круговой частотой  $\omega_D = 2\pi f_D = \pi \sin\theta = U$ . Матрица (10) с учетом (11) для одного периода сигнала примет вид

$$\begin{pmatrix} z_1 & z_2 & \dots & z_8 \\ z_8 e^{jU} & z_1 e^{jU} & \dots & z_7 e^{jU} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_2 e^{jU(N-1)} & z_3 e^{jU(N-1)} & \dots & z_1 e^{jU(N-1)} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Если в строках матрицы (12) вынести одинаковые фазовые множители, то, независимо от сдвига, М-ПСП в каждой строке даст в результате накопления в ЭП уровень, пропорциональный нормированному БЛ  $1/M$ . Тогда (11) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \gamma(\theta) &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^N \exp\{j\pi(n-1)\sin\theta\} = \\ &= \frac{N \sin(N\pi \sin\theta/2)}{M (N\pi \sin\theta/2)} = \frac{1}{M} F_{\text{ФАР}}(\theta). \end{aligned} \quad (13)$$

Из (13) следует, что БЛ каждого периода сигнала будут накапливаться пропорционально

множителю ФАР. Для  $L$  целых периодов уровень накопления вырастет до

$$\gamma(\theta) = \frac{L}{M} F_{\text{ФАР}}(\theta).$$

При накоплении части периода сигнала в (11) будут присутствовать разные по знаку и уровню БЛ, полученные в каждой строке и умноженные на фазовые множители вида  $e^{jU(n-1)}$ , поэтому уровень их накопления можно оценить в среднем как

$$\gamma(\theta) = \sqrt{N/M}.$$

Суммарный уровень БЛ можно записать как

$$\gamma(\theta) = \frac{L}{M} F_{\text{ФАР}}(\theta) + \sqrt{N/M} \approx \sqrt{N/M},$$

поскольку второе слагаемое, как и в (8), обычно существенно превышает первое.

Примеры азимутальных зависимостей уровня накопленных БЛ  $\gamma(\theta)$  приведены на рис. 5 для случая, когда дискретное время накопления в ЭП соответствовало приему  $l = 3.5$  импульсов РИП. На рис. 5, а приведены результаты машинного моделирования в среде MATLAB нормированной к числу АЭ угловой зависимости  $\gamma_0(\theta)$  в режиме традиционной ФАР для описанного выше сигнала при различных начальных фазах модулирующей М-ПСП с последующим усреднением данных восьми экспериментов. Как видно из рисунка, зависимость  $\gamma_0(\theta)$  в первом приближении аналогична множителю ФАР вида (8) и в целом соответствует выражению (9) при средних БЛ  $1/\sqrt{M}$ . На рис. 5, б приведены также усредненные по восьми экспериментам результаты моделирования накопления по БЛ  $\gamma_1(\theta)$  вида (11) для пространственно-модулированного сигнала с параметрами  $N = 8$  (число АЭ ФАР) и сдвиге задержки М-ПСП  $k = 64$  (нарастающий сдвиг в каждом АЭ). Результаты моделирования показывают, что при малых углах отклонения  $\theta \leq \pm 5^\circ$  дополнительная пространственная модуляция обеспечивает существенный выигрыш в скрытности по сравнению с традиционной РЛС с ФАР и аналогичным по структуре зондирующим сигналом. При углах  $\theta > \pm 5^\circ$  относительная скрыт-

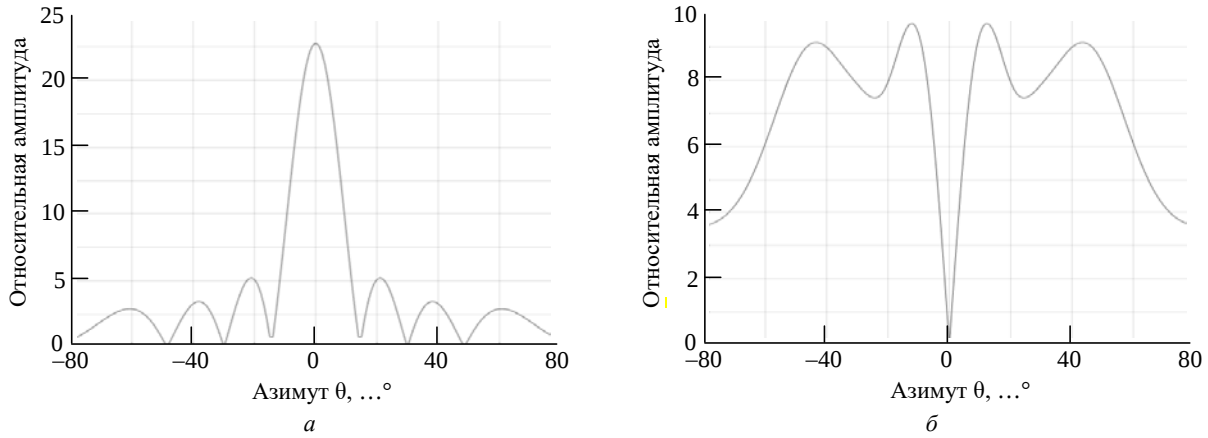


Рис. 5. Азимутальные зависимости накопления БЛ ( $m = 200$ ):  $a - \gamma_0(\theta)$ ;  $b - \gamma_1(\theta)$   
Fig. 5. Azimuthal dependencies of SL accumulation ( $m = 200$ ):  $a - \gamma_0(\theta)$ ;  $b - \gamma_1(\theta)$

ность не ухудшается и при  $l = 3.5$  в среднем не превышает уровня накопления  $\sqrt{M}/\sqrt{N}$ .

Моделирование производилось при различных значениях дискретного времени накопления в ЭП  $m$ , изменявшегося в диапазоне от 100 до 900. Выбор такого диапазона значений обусловлен формированием в выборке текущих БЛ с высоким уровнем, который превышает средний уровень БЛ более чем в 3 раза. Это должно негативно сказываться на скрытности зондирующего сигнала. Тем не менее при любых отклонениях ДН по углу абсолютный уровень накопленного в ЭП сигнала, нормированный к числу АЭ  $N = 8$ , существенно не отличался от среднего значения  $\sqrt{M}/\sqrt{N}$ , соответствующего БЛ  $\gamma_1 = \sqrt{N}/\sqrt{M}$ . Наилучшая скрытность всегда достигалась при совпадении главного лепестка ДН с азимутом объекта, на котором располагается ЭП.

Рассмотрим работу РЛС в режиме приема отраженного пространственно-модулированного сигнала. Пусть в режиме передачи ДН ФАР ориентирована по нормали к апертуре. Это позволяет положить все начальные фазы одинаковыми и равными нулю:  $\varphi_n = 0$ . Тогда отраженный сигнал, излученный и принятый  $n$ -м АЭ <sub>$n$</sub> , с учетом (2) и (4), а также двойного набег фаз в режиме приема и передачи примет вид

$$S_n(t, n) = \dot{A}_n(t - \tau) \exp\{j2\pi(f_0 - f_D)(t - \tau)\} \times \exp\{j2\pi(n - 1)\sin\theta\},$$

где  $\dot{A}_n(t - \tau) = A(t - \tau) \exp\{j\Phi[t - \tau - k\tau_0(n - 1)]\}$ .

Реально на вход АЭ <sub>$n$</sub>  поступают сигналы, излученные всеми АЭ. Суммарный отраженный от точечной цели сигнал примет вид

$$S_n^\Sigma(t, n) = S_n(t, n) + \exp\{j2\pi(f_0 - f_D)(t - \tau)\} \times \sum_{\substack{c=1 \\ (c \neq n)}}^N \dot{A}_c(t - \tau) \exp\{j\pi(c + n - 2)\sin\theta\}. \quad (14)$$

Можно выделить в (14) общие для всех слагаемых сомножители:

$$A(t - \tau) \exp\{j2\pi(f_0 - f_D)(t - \tau)\} \exp\{-j2\pi\sin\theta\} \quad (15)$$

и вынести их за скобки. При этом последний сомножитель влияет только на фазу и не зависит от времени и номера АЭ  $n$ , поэтому им можно пренебречь. Тогда с учетом (15) суммарный сигнал для АЭ <sub>$n$</sub>  можно записать как

$$S_n^\Sigma(t, n) = A(t - \tau) \exp\{j2\pi(f_0 - f_D)(t - \tau)\} \times \exp\{j\Phi[t - \tau - k\tau_0(n - 1)]\} \times \exp\{-j2\pi n \sin\theta\} + \sum_{\substack{c=1 \\ (c \neq n)}}^N \exp\{j\Phi[t - \tau - k\tau_0(c - 1)]\} \times \exp\{-j\pi(c + n - 1)\sin\theta\}, \quad (16)$$

где  $c$  – номер пространственного канала, отличного от  $n$ :  $c \neq n$ .

Вычислять корреляционный интеграл в  $n$ -м канале приема необходимо с учетом фазовых соотношений, т. е. в виде комплексной величины:

$$z_n(\tau, f_D) = \int_0^{T_a} S_{\Sigma n}(t, n) S_{\Sigma n}^*(t, n) dt, \quad (17)$$

что позволит в дальнейшем при межканальной обработке сформировать результирующую ДН. Подставив в (17) отраженный и опорный сигналы вида (16) алгоритм вычисления  $z_n(\tau, f_D)$  функционально можно представить в виде трех шагов (рис. 6).

На первом шаге осуществляется умножение на сопряженный сигнал  $A(t-\tau)\exp\{-j2\pi f_0 t\}$ , что обеспечивает перенос сигналов на нулевую несущую частоту. В результате при наличии доплеровского сдвига частоты остается множитель вида  $\exp\{-j2\pi f_D t\}$  и несущественный фазовый набег  $\exp\{-j2\pi f_D \tau\}$ , которым можно пренебречь в дальнейшем.

На втором шаге при совпадении дискретных задержек опорного и отраженного сигнала  $m_1$  происходит фазовая демодуляция и разделение по пространственным каналам отраженных сигналов. Для канальных сигналов уровень межканального проникновения определяется БЛ АКФ:  $\gamma = 1/M$ , поскольку на выходах вторых умножителей при несовпадении задержек формируется та же М-ПСП, но инверсная и с другой задержкой (свойство аддитивно-циклического сдвига [5]). При многосигнальной радиолокационной ситуации и различии отраженных сигналов по параметрам  $\tau, f_D$  средний уровень БЛ ФН остается равным  $\gamma = 1/\sqrt{M}$ , а с учетом всех пространственных каналов он увеличится в  $\sqrt{N}$ .

На третьем шаге происходит компенсация фазовых набегов сигналов, излученных другими АЭ, кроме АЭ<sub>n</sub>. С учетом азимутального угла прихода сигнала  $\theta$  опорные сигналы имеют вид  $\exp\{j\pi(c+n-1)\sin\theta\}$ . Для более компактной записи сигналов воспользуемся понятием пространственной частоты, однозначно связанной с угловой координатой в передней полуплоскости [15]:  $U = \pi \sin\theta$ . Тогда опорные сигналы на втором шаге запишутся в виде  $\exp\{jU(c+n-1)\}$ . Они обеспечат корректировку фазовых соотношений, что позволит осуществить когерентное суммирование сигналов, излученных всеми АЭ и принятых одним из N.

Второй и третий уровни умножителей на рис. 6 по сути обеспечивают известную технологию ММО [5], когда каждый АЭ ФАР излучает "свой" сигнал, отличающийся задержкой модулирующей фазы М-ПСП (много выходов), а в режиме приема каждый АЭ принимает все сигналы, излученные АЭ и отраженные от цели, с учетом их фазовых соотношений (много входов).

Рассмотрим процесс формирования ДН сначала в отдельном приемном канале, реализующийся на третьем шаге (рис. 6). Считаем операции переноса частоты в первом умножителе и фазовой демодуляции во вторых умножителях выполненными, поэтому суммарный сигнал (16) можно записать в виде

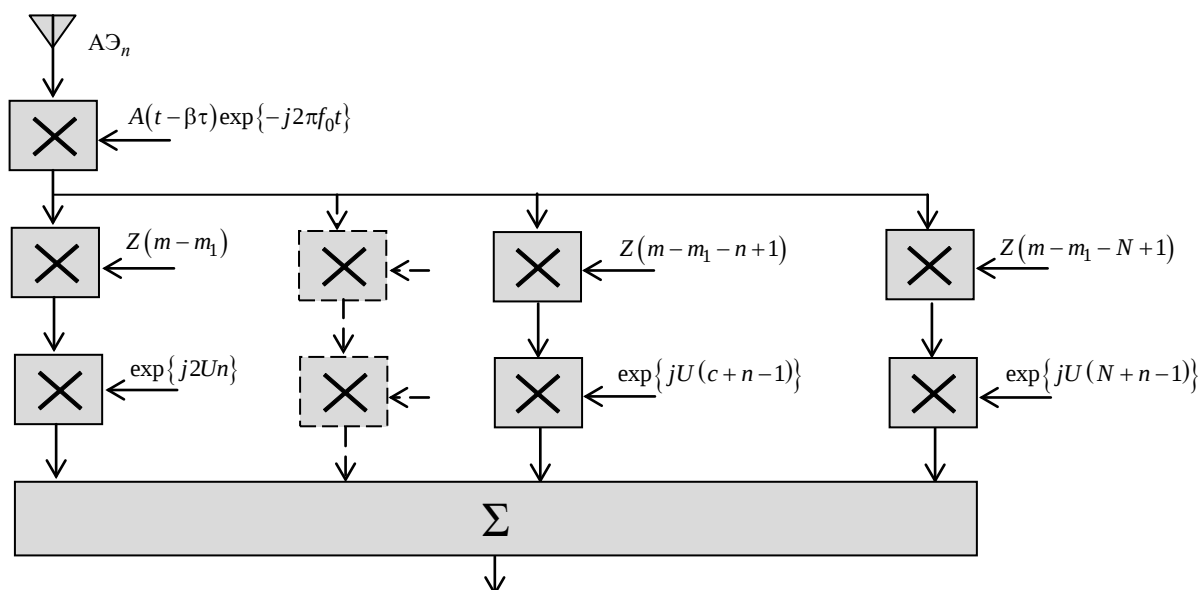


Рис. 6. Функциональная схема обработки сигнала в одном пространственном канале приема

Fig. 6. Functional diagram of signal processing in one spatial receiving channel

$$S_n^\Sigma(n) = \exp\{j2U(n-1)\} + \sum_{\substack{c=1 \\ (c \neq n)}}^N \exp\{jU(c+n-2)\}.$$

После несложных преобразований получим в базисе пространственных частот  $U$ :

$$S_n^\Sigma(U) = \exp\{j2U(n-1)\} \sum_{c=1}^N \exp\{jU(c-1)\} = M \exp\{jU(n-1)\} \frac{\sin(UM/2)}{UM/2}. \quad (18)$$

Далее сигналы всех пространственных каналов (18) поступают в блок формирования ДН (рис. 7), который работает по традиционному алгоритму синфазного суммирования сигналов АЭ.

Результирующая ДН  $F(U)$  в режиме приема и передачи и с учетом (18) примет вид

$$F(U) = M \frac{\sin(UM/2)}{UM/2} \sum_{n=1}^N \exp\{jU(n-1)\} = M^2 \left[ \frac{\sin(UM/2)}{UM/2} \right]^2. \quad (19)$$

Возвращаясь в (19) к азимутальному углу  $\theta$ , получим выражение для ДН в общем виде:

$$F(\theta) = M^2 \left[ \frac{\sin[(\sin \theta - \sin \theta_0)\pi M/2]}{(\sin \theta - \sin \theta_0)\pi M/2} \right]^2.$$

Таким образом, режим ММО позволил сформировать ДН в виде квадрата ДН приемо-передающей ФАР, как и в традиционной РЛС без

пространственной модуляции. Это свидетельствует об отсутствии энергетических потерь за счет пространственной модуляции зондирующего сигнала.

Схемы, представленные на рис. 6 и 7, формируют ДН при фиксированных параметрах  $\tau$ ,  $f_D$  и  $\theta_0$ , на которые настроены опорные сигналы всех умножителей многоканального приемника. Очевидно, что современная цифровая реализация приведенного алгоритма формирования ДН позволит реализовать параллельный обзор пространства по любому из этих параметров.

**Заключение.** Проведенные исследования показали принципиальную возможность повышения энергетической скрытности работы РЛС за счет дополнительной пространственной модуляции квазинепрерывного зондирующего сигнала, сформированного на основе троичных кодов  $\{+1, -1, 0\}$ , обладающих свойством аддитивно-циклического сдвига.

При настройке накопительного фильтра ЭП на несущую частоту сигнала РЛС и соизмеримых временах анализа сигналов в РЛС и ЭП выигрыш в относительной скрытности за счет дополнительной пространственной модуляции определяется как

$$\alpha_1 = \gamma_0/\gamma_1 = 1 + \sqrt{M}/L \approx \sqrt{M}/L. \quad (20)$$

При накоплении сигнала в ЭП за время  $T_{ЭП} \leq T$ , что часто встречается на практике, выигрыш (20) примет вид

$$\alpha_1 = 1 + \sqrt{M} \approx \sqrt{M}. \quad (21)$$

Из (21) следует вывод о целесообразности увеличения длины модулирующей М-ПСП.

Если накопительный фильтр ЭП не настро-

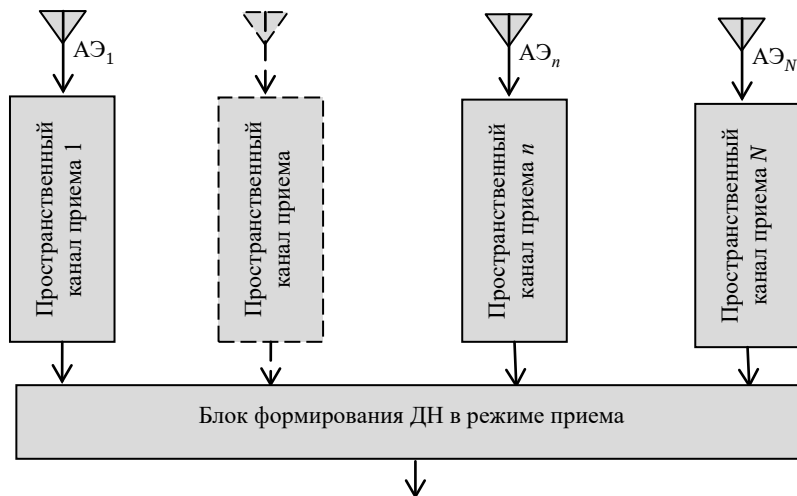


Рис. 7. Формирование ДН ФАР в режиме приема

Fig. 7. Formation of the phased array pattern in reception mode

ен на несущую частоту зондирующего сигнала, то, как показал анализ, выигрыш не зависит от соотношения времен накопления сигналов в РЛС и ЭП и составляет  $\alpha_2 = \sqrt{N}$ , откуда следует целесообразность увеличения числа АЭ.

Как показало компьютерное моделирование, отклонение ДН ФАР от направления на ЭП не ухудшает энергетическую скрытность, которая при  $T_{ЭП} \leq T$  остается в пределах

$\sqrt{NM}$ . При соизмеримых временах накопления в РЛС  $T_a$  и ЭП  $T_{ЭП}$  средний уровень накопленного сигнала возрастет пропорционально числу накапливаемых периодов  $L\sqrt{NM}$ .

Построение приемника РЛС по технологии МИМО гарантирует отсутствие энергетических потерь при приеме и пространственно-временной обработке отраженных сигналов.

### Список литературы

1. Радиотехнические системы / Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, В. М. Кутузов, В. В. Леонтьев; под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Академия, 2008. 592 с.
2. Козлов С. В. Методы и средства радиоэлектронной защиты. Минск: БГУИР, 2019. 188 с.
3. Шевченко М. Е., Чемаров А. О. Обнаружение и оценивание параметров источников радиоизлучения в широкой полосе обзора. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 136 с.
4. Шевченко М. Е., Малышев В. Н., Файзуллина Д. Н. Пеленгование источников радиоизлучения в широкой полосе частот с использованием круговой антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 30–40. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-30-40
5. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 487 с.
6. Морская радиолокация / В. И. Винокуров, В. А. Генкин, С. П. Калениченко и др.; под ред. В. И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. 256 с.
7. Акиншин Н. С., Быстров Р. П., Меньшиков В. Л. О критерии обеспечения скрытности работы РЛС пассивными методами // Журн. радиоэлектроники. 2017. № 6. С. 1–9.
8. Кутузов В. М., Коновалов А. А., Михайлов В. Н. Морская радиолокация / под ред. В. М. Кутузова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 146 с.
9. Пискунов А. В., Литвинов Н. Н., Энверов А. И. Применение частотно-фазоманипулированных сигналов в целях повышения скрытности излучения РЛС // Вестн. Концерна ВКО "Алмаз–Антей". 2023. № 2. С. 11–18.
10. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справ. 2-е изд. / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
11. Levanon N., Mozeson E. Radar signals. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 432 p.
12. Гантмахер В. Е., Быстров Н. Е., Чеботарев Д. В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и техника, 2005. 400 с.
13. Principles & Applications of Random FM Radar Waveform Design / S. D. Blunt, J. K. Jakabosky, C. A. Mohr, P. M. McCormick, J. W. Owen, B. Ravenscroft, C. Sahin, G. D. Zook, C. C. Jones, J. G. Metcalf, T. Higgins // IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine. 2020. Vol. 35, № 10. P. 20–28. doi: 10.1109/MAES.2019.2953763
14. Нахмансон Г. С. Пространственно-временная обработка широкополосных сигналов. М.: Радиотехника, 2015. 256 с.
15. Кутузов В. М., Овчинников М. А., Виноградов Е. А. Характеристики обнаружения параметрического метода обработки сигналов в неэквидистантной антенной решетке транспортируемой деkamетровой радиолокационной станции // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 43–58. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-43-58

### Информация об авторах

**Кутузов Владимир Михайлович** – доктор технических наук (1997), профессор (1998), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), президент университета. Автор более 270 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

**Ипатов Валерий Павлович** – доктор технических наук (1983), профессор (1985), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Заслуженный деятель науки РФ (2001), почетный радист СССР (1983). Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – радиоэлектронная системотехника; статистическая теория связи; широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vripatov@etu.ru

**Соколов Сергей Сергеевич** – доктор технических наук (1996), профессор (1998), профессор кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электро-

технического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 85 научных публикаций. Сфера научных интересов – регистрация процессов с двойной стохастичностью, адаптивные методы оценивания параметров сигналов; системная инженерия.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: sssokolov@etu.ru

## References

1. Kazarinov Yu. M., Kolomenskiy Yu. A., Kutuzov V. M., Leont'ev V. V. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio Engineering Systems]. Ed. by Yu. M. Kazarinov. Moscow, Academy, 2008, 592 p. (In Russ.)
2. Kozlov S. V. *Metody i sredstva radioelektronnoy zashchity* [Methods and Means of Electronic Protection]. Minsk, BSUIR, 2019, 188 p. (In Russ.)
3. Shevchenko M. E., Chemarov A. O. *Obnaruzhenie i otsenivanie parametrov istochnikov radioizlucheniya v shirokoi polose obzora* [Detection and Estimation of Parameters of Radio Emission Sources in a Wide Viewing Band. SPb., *Izd. SPbGETU "LETI"*, 2011, 136 p. (In Russ.)
4. Shevchenko M. E., Malyshev V. N., Fayzullina D. N. Radio Source Direction Finding in Wide Frequency Band Using Circular Antenna Array. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2018, no. 6, pp. 30–40. (In Russ.)
5. Ipatov V. P. *Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov. Printsipy i prilozheniya* [Broadband Systems and Code Division of Signals. Principles and Applications]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2007, 487 p. (In Russ.)
6. Vinokurov V. I., Genkin V. A., Kalenichenko S. P., et al. *Morskaya radiolokatsiya* [Marine Radar]. Ed. by V. I. Vinokurov. Leningrad, Shipbuilding, 1986, 256 p. (In Russ.)
7. Akinshin N. S., Bystrov R. P., Menshikov V. L. On the Criterion for Ensuring the Stealth of Radar Operation by Passive Methods. *J. of Radio Electronics*. 2017, no. 6, pp. 1–9. (In Russ.)
8. Kutuzov V. M., Konovalov A. A., Mikhailov V. N. *Morskaya radiolokatsiya* [Marine Radar]. Ed. by V. M. Kutuzov. SPb., *Izd. SPbGETU "LETI"*, 2016, 146 p. (In Russ.)
9. Piskunov A. V., Litvinov N. N., Enverov A. I. Application of Frequency-Shift and Phase-Shift Keyed Signals to Improve Radar Emission Secrecy. *Bulletin of the Almaz-Antey Air and Space Defence Corporation*. 2023, no. 2, pp. 11–18. (In Russ.)
10. *Radioelektronnye sistemy. Osnovy postroeniya i teoriya* [Radioelectronic Systems. Basics of Design and Theory. Handbook.] 2<sup>nd</sup> Ed. Ed. by Ya. D. Shirman. Moscow, Radio Engineering, 2007, 512 p. (In Russ.)
11. Levanon N., Mozeson E. *Radar Signals*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2004, 432 p.
12. Gantmakher V. E., Bystrov N. E., Chebotarev D. V. *Shumopodobnye signaly. Analiz, sintez, obrabotka* [Noise-Like Signals. Analysis, Synthesis, Processing]. SPb., Science and Technology, 2005, 400 p. (In Russ.)
13. Blunt S. D., Jakabosky J. K., Mohr C. A., McCormick P. M., Owen J. W., Ravenscroft B., Sahin C., Zook G. D., Jones C. C., Metcalf J. G., Higgins T. Principles & Applications of Random FM Radar Wave-form Design. *IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine*. 2020, vol. 35, no. 10, pp. 20–28. doi: 10.1109/MAES.2019.2953763
14. Nakhmanson G. S. *Prostranstvenno-vremennaya obrabotka shirokopolosnykh signalov* [Spatial-Temporal Processing of Broadband Signals]. Moscow, Radio Engineering, 2015, 256 p. (In Russ.)
15. Kutuzov V. M., Ovchinnikov M. A., Vinogradov E. A. Detection Characteristics of the Parametric Method of Signal Processing in a Sparse Antenna Array of a Transportable Decameter Range Radar. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, vol. 23, no. 6, pp. 43–58. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-43-58

## Information about the authors

**Vladimir M. Kutuzov**, Dr Sci. (Eng.) (1997), Professor (1998) of the Department of Radio Engineering Systems, President of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 270 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vmkutuzov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

**Valery P. Ipatov**, Dr Sci. (Eng.) (1983), Professor (1985) of Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Honored scientist of the RF (2001), honorable radioman of the USSR (1983). The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: radio-electronic system engineering; statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vipatov@etu.ru

**Sergey S. Sokolov**, Dr. Sci. (Eng.) (1996), Professor (1998), Professor of the Department of microradioelectronics and radio equipment technology of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of 85 scientific publications. Area of expertise: registration of processes with double stochasticity, adaptive methods for estimating signal parameters, system engineering.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: sssokolov@etu.ru

## Моделирование алгоритмов обработки в полуактивной радиолокационной системе с использованием сигнала 5G

Нгуен Ван Туан<sup>1✉</sup>, В. М. Кутузов<sup>2</sup>, Е. Н. Воробьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

✉ [hinhthien08@gmail.com](mailto:hinhthien08@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Исследования возможности использования новых телекоммуникационных сигналов в качестве подсвета в полуактивных радиолокационных системах (ПАРЛС) – актуальная задача. Развитие систем связи, в частности появление нового стандарта 5G, открывает новые горизонты для развития ПАРЛС, использующих сигналы передатчиков 5G в качестве подсвета. Теоретический анализ характеристик сигнала 5G в контексте его применения в качестве подсвета в ПАРЛС показывает возможность обеспечения высокого разрешения по дальности и скорости. В данной статье приведены результаты моделирования процесса обработки сигналов в ПАРЛС с помощью сигнала 5G для двух сценариев: с нахождением одиночного объекта и двух объектов в области наблюдения. Поскольку ввиду пока еще ограниченного использования сети 5G на территории России экспериментальные исследования затруднены, моделирование процесса обработки сигнала в ПАРЛС с помощью 5G – актуальная задача.

**Цель работы.** Анализ нисходящего сигнала 5G и моделирование обработки сигналов в ПАРЛС от источника подсвета 5G в разных сценариях.

**Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели использовались основы теории обработки сигналов в ПАРЛС, стандарт и структура 5G, модель канала распространения сигнала 5G, сравнительный анализ. Расчет взаимной функции неопределенности ПАРЛС с использованием сигнала 5G проведен с помощью компьютерного моделирования.

**Результаты.** Проведено моделирование процесса обработки сигналов в разных сценариях. Результаты показывают, что ПАРЛС с использованием сигнала 5G способна обнаруживать цели с хорошим разрешением как по дальности, так и по скорости.

**Заключение.** Результаты моделирования дополнительно подтверждают возможность эффективного использования сигнала подсвета 5G в ПАРЛС с целью мониторинга на относительно небольших территориях.

**Ключевые слова:** взаимная функция неопределенности, полуактивная радиолокация, пассивный когерентный радиолокатор, сеть 5G, сигнал подсвета

**Для цитирования:** Нгуен Ван Туан, Кутузов В. М., Воробьев Е. Н. Моделирование алгоритмов обработки в полуактивной радиолокационной системе с использованием сигнала 5G // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 44–54. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-44-54

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; принята к публикации после рецензирования 22.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

## Signal Processing in Passive Radar Systems Using 5G: A Simulation Study

Nguyen Van Tuan<sup>1✉</sup>, Vladimir M. Kutuzov<sup>2</sup>, Evgenii N. Vorobev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

✉ hinhthien08@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Research into the potential use of new telecommunication signals for illumination in passive radar systems is an important task. The development of communication technologies, particularly the emergence of 5G, offers opportunities for the advancement of passive radar systems that utilize 5G transmitters as illuminators. A theoretical analysis of the 5G signal characteristics in the context of its use for illumination in passive radar systems reveals the potential for high resolution in terms of range and velocity. This article presents the results of simulations of the signal processing process in passive radar systems using a 5G signal for two scenarios: with the presence of a single object and two objects in the observation field. The limited availability of 5G networks in Russia impedes experimental studies. Therefore, simulation of the signal processing process in passive radar systems using 5G signals for object illumination is a relevant task.

**Aim.** Analysis of 5G downlink signal and simulation of signal processing in passive radar with 5G illumination source in different scenarios.

**Materials and methods.** The theory of signal processing in semi-active radar, 5G standard and structure, a model of the 5G signal propagation channel, and comparative analysis were used. The calculation of the cross-ambiguity function of the passive radar using the 5G signal was carried out by computer simulation.

**Results.** The conducted simulation of the signal processing process in different scenarios found that passive radar using a 5G signal is capable of detecting targets with good resolution in terms of both range and velocity.

**Conclusion.** The simulation results further support the potential for effective use of the 5G illumination signal in passive radar for monitoring purposes in relatively small areas.

**Keywords:** cross-ambiguity function, passive radar, passive coherent radar, 5G network, illumination signal

**For citation:** Nguyen Van Tuan, Kutuzov V. M., Vorobev E. N. Signal Processing in Passive Radar Systems Using 5G: A Simulation Study. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 44–54. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-44-54

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 21.10.2024; accepted 22.11.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Полуактивная радиолокация, использующая сторонние источники подсвета, – одно из наиболее активно развивающихся направлений исследований и разработок в сфере создания систем воздушного и морского наблюдения. В последние годы значительные усилия были направлены на улучшение основных алгоритмов обработки с точки зрения как минимизации вычислительной сложности, так и достижимой эффективности [1–3]. Кроме то-

го, при разработке новых полуактивных радиолокационных систем (ПАРЛС) продолжают исследования в направлении использования новых появляющихся источников сигналов [4–7].

Развитие сетей 5G приводит к появлению новых источников освещения для полуактивных радаров. Согласно предыдущим оценкам и исследованиям [8], ПАРЛС с использованием сигнала 5G имеет относительно ограниченное покрытие и рабочую зону, но обладает высоким

разрешением по дальности и скорости. ПАРЛС с использованием сигнала 5G можно применять для мониторинга транспортных средств, в частности, для обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте или на перекрестках.

Сегодня сети связи 5G вводятся в эксплуатацию во многих странах мира, в том числе в России и Вьетнаме. Стандарт 5G имеет гибкую структуру частотного спектра, и страны сами определяют оптимальные частотные диапазоны для его использования. Каждый диапазон имеет свои уникальные технические особенности. Это, в свою очередь, обуславливает различия в исследованиях, проводимых для радиолокационных станций, включая используемые несущую частоту и полосу пропускания.

В настоящее время в России проведение исследований по использованию сигналов 5G в ПАРЛС сталкивается с определенными трудностями. Экспериментальная сеть пятого поколения пока доступна лишь в нескольких определенных местах некоторых регионов, а количество пользовательских устройств, поддерживающий этот стандарт связи, ограничено. В связи с этим моделирование становится одним из основных методов для оценки возможностей ПАРЛС с использованием сигналов 5G.

В данной статье рассмотрены структура и основные характеристики сигнала 5G нисходящей линии, который тестируется в России. Выполнено моделирование двух возможных радиолокационных сценариев: с одной и двумя подвижными целями в многолучевой обстановке, проведен анализ результатов моделирования.

**Сигнал 5G.** Частотный ресурс мобильных сетей 5G разделен на 2 частотных диапазона [9]. Первый диапазон частот (FR1) включает в себя частоты ниже 6 ГГц, второй (FR2) – от 24.25 до 71.0 ГГц. Максимальная полоса пропускания в FR1 составляет 100 МГц, в FR2 – 400 МГц.

В конце января 2024 г. правительство РФ утвердило решение о выделении диапазона частот от 4.4 до 4.99 ГГц для работы 5G-сетей на территории России. В соответствии с технической спецификацией стандарта пятого поколения в проекте 3GPP диапазон 4.4...4.99 ГГц относится к полосе n79 (4.4...5 ГГц). В табл. 1 представлены параметры сигнала для полосы n79.

Передача в сетях 5G основана на циклическом мультиплексировании с префиксно-орто-

Табл. 1. Нумерология для сигнала 5G в n79

Tab. 1. Numerology for 5G signal in n79

| $\mu$ | $\Delta f_c$ ,<br>кГц | Полоса<br>пропускания,<br>МГц                 | $N_{сл}$ | $N_{сим}$       | Циклический<br>префикс           |
|-------|-----------------------|-----------------------------------------------|----------|-----------------|----------------------------------|
| 0     | 15                    | 10, 20, 30,<br>40, 50                         | 1        | 14              | Нормальный                       |
| 1     | 30                    | 10, 20, 30, 40,<br>50, 60, 70, 80,<br>90, 100 | 2        | 14              | Нормальный                       |
| 2     | 60                    | 10, 20, 30, 40,<br>50, 60, 70, 80,<br>90, 100 | 4        | 14<br>или<br>12 | Нормальный<br>или<br>расширенный |

гональным частотным разделением (CP-OFDM). В отличие от сигнала LTE, который поддерживает только один тип разнесения поднесущих,  $\Delta f_c = 15$  кГц, в 5G используются поднесущие с различной шириной спектра [10]. Поднесущие сигнала 5G зависят от нумерологии, которая описывается параметром  $\mu \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ , и определяются по формуле  $\Delta f_c = 2^\mu \cdot 15$ .

Ресурсы сигналов 5G распределяются во временной и частотной областях. Во временной области сигнал 5G измеряется в кадрах. Один кадр имеет длину 10 мс и состоит из 10 подкадров длиной 1 мс. Каждый подкадр делится на слоты, количество которых  $N_{сл} = 2^\mu$ . В одном слоте, в зависимости от вида циклического префикса, содержится 14 или 12 символов. Один символ – это наименьший временной интервал во временной области, а в частотной области наименьший квант частоты – поднесущая. Элемент ресурса – это наименьший частотно-временной ресурс, состоящий из одного символа и одной поднесущей. Блок ресурсов определен только в частотной области и состоит из 12 поднесущих. Все доступные блоки ресурсов составляют так называемую сетку ресурсов. Ресурсы выделяются для нескольких каналов и сигналов. В данной статье основное внимание уделяется следующим физическим сигналам и каналам нисходящей линии связи:

- Primary Synchronization signal (PSS) – сигнал первичной синхронизации, позволяющий пользовательским устройствам выполнить синхронизацию по частоте и времени;
- Secondary Synchronization signal (SSS) – сигнал вторичной синхронизации, используемый для определения физической идентификации соты;

– Physical Broadcast Channel (PBCH) – физический широковещательный канал для передачи системной информации на пользовательские устройства во время поиска соты;

– Physical Downlink Control Channel (PDCCH) – физический нисходящий канал управления для передачи управляющей информации от базовой станции к пользовательскому устройству;

– Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) – физический нисходящий общий канал для передачи пользовательских данных от базовой станции к пользовательскому устройству;

– Demodulation reference signal (DM-RS) – опорный сигнал демодуляции, позволяющий пользовательским устройствам выполнить оценку канала и демодуляцию связанных физических каналов;

– Phase-tracking reference signal (PT-RS) – опорный сигнал отслеживания, позволяющий оценить и минимизировать влияние общей фазовой ошибки на производительность системы;

– Channel-state information reference signal (CSI-RS) – опорный сигнал, содержащий информацию о состоянии канала, позволяет оценить канал и сообщить информацию о его качестве.

Каждый из этих каналов/сигналов имеет разное назначение, располагается в разных местах частотно-временной сетки и по-разному кодируется.

### Сценарий полуактивной радиолокации.

Типичный радиолокационный сценарий для ПАРЛС на базе 5G показан на рис. 1. Базовая станция 5G работает как источник подсвета для всей радиолокационной сцены. Приемная позиция ПАРЛС состоит из двух каналов сбора данных: опорного и канала наблюдения. Опорный канал служит для приема исходного передаваемого сигнала. Это достигается посредством направления антенны на передатчик. Другая антенна смотрит в сторону предполагаемой зоны наблюдения за целью и является приемным каналом эхосигнала.

Сигнал опорного канала

$$s_{\text{прям}}(t) = A_0 x(t - \tau_0) + \omega_{\text{прям}}(t),$$

где  $A_0$  – комплексная амплитуда прямого сигнала при времени задержки  $\tau_0$  в опорном канале;  $x(t)$  – сигнал, передаваемый от источника подсвета;  $\omega_{\text{прям}}(t)$  – шум в опорном канале.

Сигнал канала наблюдения состоит из четырех частей. Первая – это сигнал прямой трассы ( $s_{\text{прям}}(t)$ ); вторая состоит из эхосигналов, отраженных от целей ( $s_{\text{эхо}}(t)$ ); третья – сигналы, определяемые многолучевым распространением, отраженные от неподвиж-

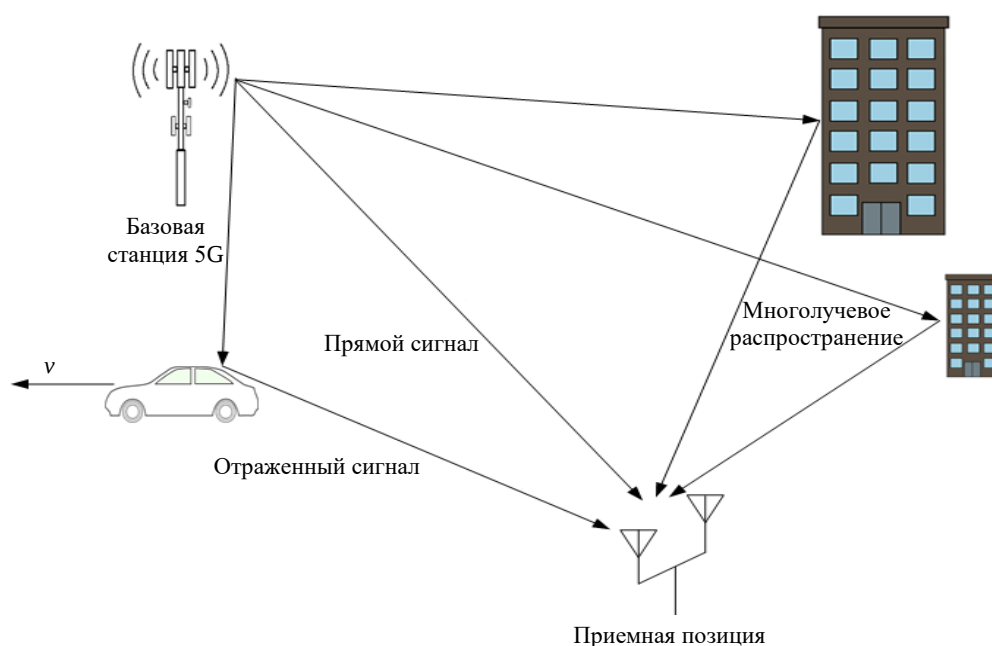


Рис. 1. Сценарий полуактивной радиолокации

Fig. 1. Passive radar scenario

ных объектов на заднем плане ( $s_{\text{мног}}(t)$ ); и последняя – шумовой сигнал в канале наблюдения ( $\omega_{\text{наб}}(t)$ ). Тогда общее выражение для принятого сигнала

$$s_{\text{наб}}(t) = s_{\text{прям}}(t) + s_{\text{эхо}}(t) + s_{\text{мног}}(t) + \omega_{\text{наб}}(t),$$

или

$$s_{\text{наб}}(t) = Ax(t - \tau_0) + \sum_{m=1}^M A_m x(t - \tau_m) + \sum_{k=1}^K A_k x(t - \tau_k) e^{j2\pi f_{Dk} t} + \omega_{\text{наб}}(t),$$

где  $A$  – комплексная амплитуда прямого сигнала в канале наблюдения;  $M$  – количество стационарных источников помех;  $A_m$  – комплексная амплитуда стационарных помех;  $K$  – количество целевых источников;  $A_k$  – комплексная амплитуда принятого сигнала от  $k$ -й цели с задержкой  $\tau_k$ ;  $f_{Dk}$  – доплеровский сдвиг  $k$ -й цели;  $\omega_{\text{наб}}(t)$  – шум в канале наблюдения.

На приемной позиции для определения би-статической дальности и скорости цели вычисляется взаимная функция неопределенности (ВФН) сигналов в каналах наблюдения и прямого пути

$$\chi(\tau, f_D) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{\text{наб}}(t) s_{\text{прям}}^*(t - \tau) e^{-j2\pi f_D t} dt.$$

Зачастую мощность прямого сигнала, сигналов, обусловленных многолучевым распространением, и помех намного больше, чем у сигнала от цели, что приводит к маскированию эхосигналов от движущейся цели, следовательно, процедура их подавления имеет решающее значение для работы ПАРЛС. Сумма  $s_{\text{прям}}(t) + s_{\text{мног}}(t)$  представляет собой нежелательную составляющую, уровень которой следует минимизировать методами фильтрации помех. Для подавления влияния мешающих сигналов из-за прямого и многолучевого распространения в канале наблюдения применяется адаптивная фильтрация. Наиболее распространенными из адаптивных фильтров являются: метод наименьших квадратов (Least Mean Square – LMS); нормализованный метод

наименьших квадратов (NLMS); рекурсивный метод наименьших квадратов (Recursive Least Square – RLS); алгоритм подавления мощных отражений (Extensive Cancellation Algorithm – ECA) и среднеквадратический решетчатый фильтр (Least Square Lattice – LSL). Каждый из алгоритмов имеет свои особенности. В описываемой работе для подавления помех используется алгоритм, основанный на LMS. От других методов [11, 12] алгоритм LMS отличают следующие преимущества: простота расчета, простота применения и высокая надежность.

**Метод наименьших квадратов (LMS)** является наиболее широко используемым алгоритмом адаптивной фильтрации на практике. Он предназначен для имитации желаемого фильтра посредством нахождения его коэффициентов, которые относятся к получению наименьшего среднего квадрата сигнала ошибки.

Алгоритм фильтрации на основе наименьших квадратов разделен на 2 основных процесса – фильтрации и адаптации [13, 14]. В процессе фильтрации выполняются две основные операции: вычисление выходного сигнала фильтра с использованием входного дискретного сигнала и сигнала ошибки, который представляет собой разницу между желаемым ответом и выходным сигналом фильтра.

Выходной дискретный сигнал фильтра LMS можно описать следующим образом:

$$y(k) = \sum_{n=0}^N w_n x(k - n),$$

где  $w$  – адаптивный коэффициент фильтра;  $x(k)$  – входной дискретный сигнал.

Сигнал ошибки

$$e(k) = d(k) - \sum_{n=0}^N w_n x(k - n) = d(k) - \mathbf{x}^T(k) \mathbf{w},$$

где  $d(k)$  – образцовый сигнал;  $\mathbf{x}(k)$  и  $\mathbf{w}$  – векторы-столбцы.

В процессе адаптации веса фильтра корректируются с использованием ошибки, которая оценивается в процессе фильтрации.

Веса фильтра определяются выражением

$$\mathbf{w}(k + 1) = \mathbf{w}(k) + \mu \mathbf{x}(k) e(k),$$

где  $\mu$  – положительный коэффициент (размер шага).

Обычно значения временной задержки и доплеровского сдвига цели в ПАРЛС оцениваются посредством обнаружения пиков ВФН между опорным сигналом и остаточным сигналом  $s_e$  (т. е. сигналом ошибки адаптивного фильтра), содержащим желаемый эхосигнал от цели после подавления помех. Дискретное временное выражение ВФН определяется как

$$\chi(l, p) = \sum_{i=0}^{M-1} s_e(i) s_{\text{опор}}^*(i-l) e^{-j2\pi p i/M},$$

где  $l=0, \dots, R-1$  – номер элемента дальности (задержки);  $R$  – число элементов дальности;  $p=-P, -P+1, \dots, P-1, P$  – номер доплеровского канала;  $2P+1$  – число доплеровских каналов.

**Параметры моделирования.** Текущие потребности пользователей являются основой для распределения частотно-временных ресурсов сетевым планировщиком.

В зависимости от уровня спроса на ресурсы планировщик может задействовать их все полностью, когда нагрузка очень высока, и почти не использовать (за исключением сигнала синхронизации), если нагрузка минимальна.

При моделировании рассмотрена ситуация, в которой к базовой станции, обслуживающей сектор связи, подключено одно пользовательское устройство 5G, постоянно обменивающееся данными с базовой станцией. При этом полагается, что сигнал 5G работает в режиме временного разделения (Time Division Duplex – TDD). Технические параметры сигнала 5G, использованные при моделировании, приведены в табл. 2.

На рис. 2 показан сигнал 5G нисходящей линии для одного пользователя во временной области.

На практике в процессе обработки сигналов в ПАРЛС должна выполняться процедура восстановления опорного сигнала. Взаимосвязь между сигналами и каналами нисходящего сигнала 5G, а также процесс восстановления опорного сигнала предполагается более подробно рассмотреть в последующих исследованиях.

При моделировании нежелательных составляющих в канале наблюдения использована методика, приведенная в [15]. Этот документ описывает методологию моделирования, проектирования, моделирования алгоритмов обработки

в полуактивной радиолокационной системе с использованием сигнала 5G  
Signal Processing in Passive Radar Systems Using 5G: A Simulation Study

Табл. 2. Параметры для моделирования нисходящего сигнала 5G

Tab. 2. Parameters for modeling 5G downlink signal

| Параметр                                        | Значение                                            |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Каналы и сигналы                                | PSS, SSS, PBCH, PDCCH, PDSCH, DM-RS                 |
| Центральная частота, МГц                        | 4850                                                |
| Ширина полосы пропускания ( $\Delta f_0$ ), МГц | 40                                                  |
| Интервал поднесущих, кГц                        | PSS, SSS и PBCH: 30, остальные каналы и сигналы: 15 |
| Время накопления ( $T_c$ ), мс                  | 100                                                 |
| Частота дискретизации, МГц                      | 61.44                                               |
| Период повторения ( $T_b$ ), мс                 | 10                                                  |
| Отношение сигнал/шум в канале наблюдения, дБ    | 20                                                  |
| Отношение сигнал/шум в опорном канале, дБ       | 100                                                 |

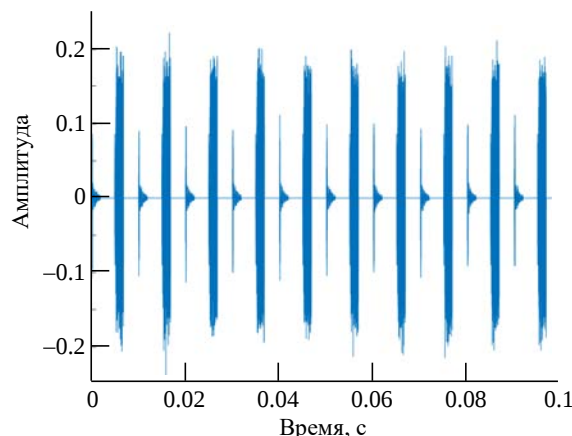


Рис. 2. Сигнал 5G для одного пользователя во временной области

Fig. 2. 5G signal for one user in time domain

оптимизации и оценки систем 5G, сформулированную 3GPP. Модель канала применима для моделирования на уровне канала и системы в различных условиях. Например, для моделирования на системном уровне поддерживаются такие сценарии, как городская макросота, внутренний офис, сельская макросота и крытая фабрика. При этом для моделирования распространения сигнала 5G в каждом из сценариев системного уровня возможны случаи как присутствия прямой видимости (Line of Sight – LOS), так и отсутствия прямой видимости (Non Line of Sight – NLOS) и т. д.

В [15] определены две стохастические модели каналов для оценки параметров связи между базовой станцией 5G и пользовательскими устройствами в различных сценариях: линия задержки по кластерам (Clustered delay line – CDL) и ответвленная линия задержки (Tapped delay line – TDL). Каждый кластер в модели каналов CDL содержит многолучевые компоненты с одинаковой задержкой, но с незначительными различиями в углах излучения и приема. TDL – это упрощенная модель канала связи, которая используется в случае моделирования физического уровня мобильных систем связи без моделирования метода пространственного кодирования сигнала (multiple-input and multiple-output – MIMO). Вместо использования общих моделей, доступных в стандартах, в данной статье предлагается новая модель канала для городской макросоты – сценария с присутствием прямой видимости по правилам, определенным в [15].

Многолучевое распространение приводит к различным задержкам, которые могут быть получены случайным образом из распределения задержек в модели канала

$$\tau'_n = -r_\tau \Delta\tau \ln X_n,$$

где  $r_\tau$  – коэффициент пропорциональности распределения задержек;  $\Delta\tau$  – рассеяние задержки (Delay Spread), возникающее из-за многолучевого распространения [15];  $X_n$  – случайная величина, имеющая равномерное распределение по (0, 1).

В процессе моделирования осуществляется нормирование задержки, вычитание минимальной задержки и сортировка их в порядке возрастания:

$$\tau_n = \text{sort}(\tau'_n - \min(\tau'_n)).$$

Для условия LOS задержка равна:

$$\tau_n^{\text{LOS}} = \frac{\tau_n}{0.7705 - 0.0433K + 0.0002K^2 + 0.000017K^3}.$$

Мощность кластера рассчитывается как

$$P'_n = \exp\left(-\tau_n \frac{r_\tau - 1}{r_\tau \Delta\tau}\right) 10^{\frac{-Z_n}{10}},$$

где  $Z_n \sim N(0, \xi^2)$  – коэффициент затенения для каждого кластера, дБ.

Мощность кластера нормирована следующим образом:

$$P_n = \frac{P'_n}{\sum_{n=1}^N P'_n}.$$

Для условия LOS к первому кластеру добавляется дополнительный зеркальный компонент, а мощность кластера определяется как

$$P_n = \frac{1}{K_R + 1} \frac{P'_n}{\sum_{n=1}^N P'_n} + \delta(n-1) \frac{K_R}{K_R + 1},$$

где  $K_R$  – K-фактор Райса, преобразованный в линейную шкалу;  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция.

В табл. 3 представлены вычисленные параметры разработанной модели канала, которые используются далее при моделировании многолучевого сценария в ПАРЛС.

Табл. 3. Параметры модели канала

Tab. 3. Channel model parameters

| Номер | Задержка, нс | Мощность, дБ |
|-------|--------------|--------------|
| 1     | 0            | –0.2         |
| 2     | 210          | –19.1        |
| 3     | 215          | –15.9        |
| 4     | 805          | –24.2        |
| 5     | 1050         | –21.1        |
| 6     | 2075         | –24.9        |

Для фильтрации помех при моделировании используется адаптивный фильтр LMS с размером шага 0.01 и длиной фильтра  $M = 64$ .

**Результаты моделирования.** Рассмотрены 2 сценария для городской макросоты, в которых гипотетическая цель располагается в зоне покрытия до 650 м и имеет скорость меньше 60 км/ч.

Для заданных параметров сигнала 5G (табл. 2) наилучшее разрешение по дальности составляет 3.75 м ( $\Delta R = c/(2\Delta f_0)$ ), а наилучшее разрешение по радиальной скорости 0.31 м/с ( $\Delta v_r = \lambda/(2T_c)$ ).

В первом сценарии проведено моделирование одиночной цели со значениями бистатической дальности  $R_b = 120$  м и скорости  $v_b = 40$  км/ч. Результаты моделирования показаны на рис. 3.

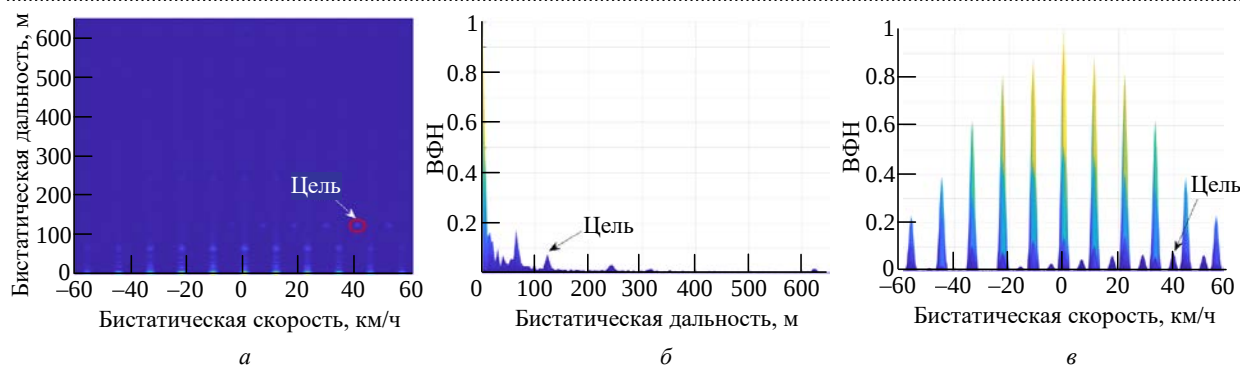


Рис. 3. ВФН до адаптивной фильтрации при первом сценарии: *a* – плоскость дальность–скорость; *б* – поперечное сечение ВФН по дальности; *в* – поперечное сечение ВФН по скорости

Fig. 3. CAF before adaptive filtering for the first scenario: *a* – the range–Doppler plane; *б* – the range cross section; *в* – the velocity cross section

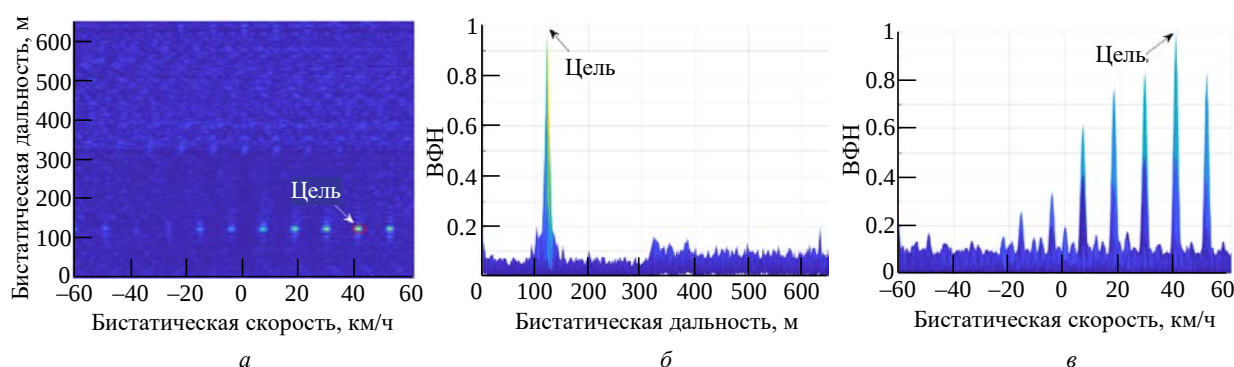


Рис. 4. ВФН после адаптивной фильтрации при первом сценарии: *a* – плоскость дальность–скорость; *б* – поперечное сечение ВФН по дальности; *в* – поперечное сечение ВФН по скорости

Fig. 4. CAF after adaptive filtering for the first scenario: *a* – the range–plane; *б* – the range cross section; *в* – the velocity cross section

Из рис. 3, *a* можно заметить, что до адаптивной фильтрации обнаружение цели затруднено из-за сильных помех и многолучевого распространения. Самому большому пику в плоскости дальность–доплеровское смещение соответствует прямой сигнал в канале наблюдения. Отметка цели отличается от других отметок доплеровским смещением. Напротив, цель хорошо обнаруживается после адаптивной фильтрации, как показано на рис. 4, *a*.

На рис. 3, *a*, *в* и 4, *a*, *в* видно появление нежелательного ряда ложных пиков. При несущей частоте 4850 МГц нисходящий сигнал 5G для одного пользователя повторяется с периодом  $T_b = 10$  мс (см. рис. 2), а ложные пики повторяются с интервалом бистатической скорости  $v_{\text{л}} = \frac{\lambda}{2T_b} \approx 3.093$  м/с (11.13 км/ч).

В случае высокого спроса на ресурсы 5G (т. е. при большом числе пользователей) нисходя-

щий сигнал 5G заполняется почти по всем символам, что приводит к значительному уменьшению уровня ложных пиков. Однако, соответственно, процесс обработки нисходящего сигнала 5G становится алгоритмически более сложным.

Во втором сценарии приведена гипотетическая ситуация для демонстрации разрешающей способности по дальности и скорости ПАРЛС с использованием сигнала 5G. Две цели имеют близкую бистатическую дальность и скорость, соответственно  $R_{b1} = 160$  м;  $v_{b1} = 38$  км/ч и  $R_{b2} = 165$  м;  $v_{b2} = 36$  км/ч. Результаты моделирования второго сценария после адаптивной фильтрации показаны на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что отметки двух целей расположены близко друг к другу, но могут быть четко различимы.

**Заключение.** В статье проведен анализ нисходящих сигналов и каналов в системе связи 5G в диапазоне n79, утвержденном к ис-

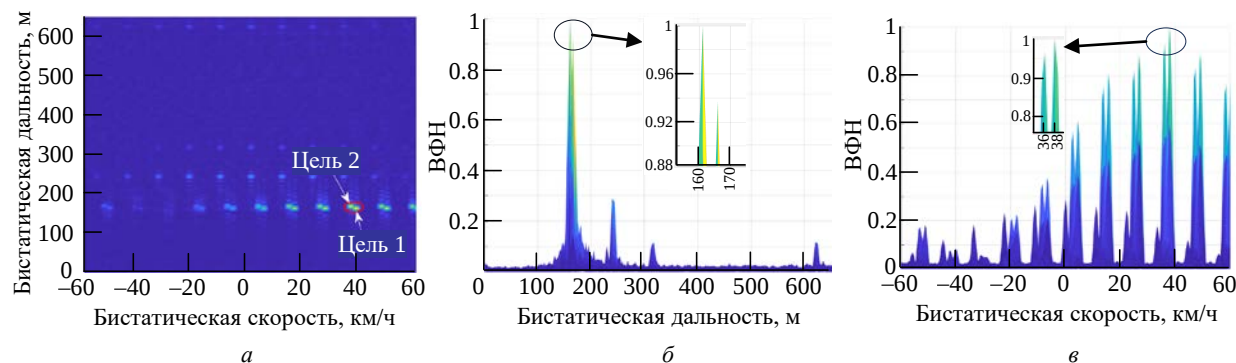


Рис. 5. ВФН во втором сценарии: а – плоскость дальность–доплеровская скорость; б – поперечное сечение ВФН по дальности; в – поперечное сечение ВФН по скорости

Fig. 5. CAF in the second scenario: а – range-Doppler plane; б – range cross section; в – velocity cross section

пользованию в России. Выполнено моделирование процесса обработки сигналов 5G, используемых в качестве подсвета в ПАРЛС, а также проведен анализ результатов расчета ВФН для двух радиолокационных сценариев. Результаты моделирования показывают, что ПАРЛС с использованием сигнала 5G способна

обнаруживать цели с хорошим разрешением как по дальности, так и по скорости. Результаты моделирования дополнительно подтверждают возможность эффективного использования сигналов связи 5G в ПАРЛС в качестве подсвета с целью мониторинга обстановки на относительно небольших территориях.

### Список литературы

1. Range Resolution Improvement of GNSS-Based Passive Radar via Incremental Wiener Filter / Z. He, Y. Yang, W. Chen, D. Weng // IEEE Geoscience and Remote Sensing Let. 2022. Vol. 19. P. 1–5. Art. № 4020005. doi: 10.1109/LGRS.2021.3130062
2. DVB-T Receiver Independent of Channel Allocation, With Frequency Offset Compensation for Improving Resolution in Low Cost Passive Radar / P.-J. Gómez-del-Hoyo, M.-P. Jarabo-Amores, D. Mata-Moya, N. del-Rey-Maestre, M. Rosa-Zurera // IEEE Sensors J. 2020. Vol. 20, № 24. P. 14958–14974. doi: 10.1109/JSEN.2020.3011129
3. Exploitation of Long Coherent Integration Times to Improve Drone Detection in DVB-S based Passive Radar / T. Martelli, O. Cabrera, F. Colone, P. Lombardo // IEEE Radar Conf. (RadarConf20), Florence, Italy, 21–25 Sept. 2020. IEEE, 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266624
4. Gomez-Del-Hoyo P., Gronowski K., Samczynski P. The STARLINK-based passive radar: preliminary study and first illuminator signal measurements // 23<sup>rd</sup> Intern. Radar Symp. (IRS), Gdansk, Poland, 12–14 Sept. 2022. IEEE, 2022. P. 350–355. doi: 10.23919/IRS54158.2022.9905046
5. Passive Radar Architecture based on Broadband LEO Communication Satellite Constellations / R. Blázquez-García, M. Ummenhofer, D. Cristallini, D. O'Hagan // IEEE Radar Conf., New York, USA, 21–25 March 2022. IEEE, 2022. P. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2248738.2022.9764342
6. LTE-based passive radars and applications: a review / P. K. Rai, A. Kumar, M. Z. A. Khan, L. R. Cenkeramaddi // Intern. J. of Remote Sensing. 2021. Vol. 42, iss. 19. P. 7489–7518. doi: 10.1080/01431161.2021.1959669
7. Passive Radar Imaging Based on Multistatic Combination of Starlink and OneWeb Illumination / R. Blázquez-García, T. Hauschild, P. Markiton, M. Ummenhofer, V. Seidel, D. Cristallini // IEEE Radar Conf. (RadarConf24), Denver, USA, 06–10 May 2024. IEEE, 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2458775.2024.10548646
8. Анализ возможностей использования сигналов подсвета 5G в полуактивной радиолокационной системе / В. М. Кутузов, В. И. Веремьев, Н. Туан, Е. Н. Воробьев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 67–78. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-67-78
9. 3GPP TS 38.104 ver. 16.6.0 Release 16. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/138104/16.06.00\\_60/ts\\_138104v160600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/16.06.00_60/ts_138104v160600p.pdf) (дата обращения 02.10.2024)
10. 3GPP TS 38.211 ver. 16.6.0 Release 16. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138200\\_138299/138211/16.06.00\\_60/ts\\_138211v160600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/16.06.00_60/ts_138211v160600p.pdf) (дата обращения 02.10.2024)
11. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 163 с.
12. Griffiths H. D., Baker C. J. An introduction to passive radar. London: Artech House, 2017. 215 p.
13. Farhang-Boroujeny B. Adaptive filters theory and applications. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2013. 802 p.
14. Nascimento V. H., Silva M. T. M. Chapter 12. Adaptive Filters // Academic Press Library in Signal Processing. 2014. Vol. 1. P. 619–761. doi: 10.1016/B978-0-12-396502-8.00012-7

15. 3GPP TR 38.901 ver. 16.1.0 Release 16. URL: 8901/16.01.00\_60/tr\_138901v160100p.pdf (дата обращения 02.10.2024)  
[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/138900\\_138999/13](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/13)

### Информация об авторах

**Нгуен Ван Туан** – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2021), аспирант Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; полуактивная радиолокация.

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиен, Ханой, Вьетнам

E-mail: [hinhthien08@gmail.com](mailto:hinhthien08@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-5652-6111>

**Кутузов Владимир Михайлович** – доктор технических наук (1997), профессор (1998), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), президент университета. Автор более 270 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: [vmkutuzov@etu.ru](mailto:vmkutuzov@etu.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

**Воробьев Евгений Николаевич** – кандидат технических наук (2022), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – полуактивная радиолокация; радиолокационное распознавание.

Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: [envorobev@etu.ru](mailto:envorobev@etu.ru)

<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>

### References

1. He Z., Yang Y., Chen W., Weng D. Range Resolution Improvement of GNSS-Based Passive Radar via Incremental Wiener Filter. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Let.* 2022, vol. 19, art. no. 4020005, pp. 1–5. doi: 10.1109/LGRS.2021.3130062

2. Gómez-del-Hoyo P.-J., Jarabo-Amores M.-P., Mata-Moya D., del-Rey-Maestre N., Rosa-Zurera M. DVB-T Receiver Independent of Channel Allocation, With Frequency Offset Compensation for Improving Resolution in Low Cost Passive Radar. *IEEE Sensors J.* 2020, vol. 20, no. 24, pp. 14958–14974. doi: 10.1109/JSEN.2020.3011129

3. Martelli T., Cabrera O., Colone F., Lombardo P. Exploitation of Long Coherent Integration Times to Improve Drone Detection in DVB-S based Passive Radar. *IEEE Radar Conf. (RadarConf20)*, Florence, Italy, 21–25 Sept. 2020. IEEE, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266624

4. Gomez-Del-Hoyo P., Gronowski K., Samczynski P. The STARLINK-Based Passive Radar: Preliminary Study and First Illuminator Signal Measurements. 23<sup>rd</sup> Intern. Radar Symp. (IRS), Gdansk, Poland, 12–14 Sept. 2022. IEEE, 2022, pp. 350–355. doi: 10.23919/IRS54158.2022.9905046

5. Blázquez-García R., Ummenhofer M., Cristallini D., O'Hagan D. Passive Radar Architecture based on Broadband LEO Communication Satellite Constellations. *IEEE Radar Conf.*, New York, USA, 21–25 March 2022. IEEE, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2248738.2022.9764342

6. Rai P. K., Kumar A., Khan M. Z. A., Cenkeramaddi L. R. LTE-Based Passive Radars and Applications: A Review. *Intern. J. of Remote Sensing.*

2021, vol. 42, iss. 19, pp. 7489–7518. doi: 10.1080/01431161.2021.1959669

7. Blázquez-García R., Hauschild T., Markiton P., Ummenhofer M., Seidel V., Cristallini D. Passive Radar Imaging Based on Multistatic Combination of Starlink and OneWeb Illumination. *IEEE Radar Conf. (RadarConf24)*, Denver, USA, 06–10 May 2024. IEEE, 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2458775.2024.10548646

8. Kutuzov V. M., Veremyev V. I., Nguyen Van Tuan, Vorobev E. N. Feasibility Study of Using 5G Signals for Illumination Purposes in Passive Radar. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2024, vol. 27, no. 1, pp. 67–78. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-67-78 (In Russ.)

9. 3GPP TS 38.104 ver. 16.6.0 Release 16. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/138104/16.06.00\\_60/ts\\_138104v160600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/16.06.00_60/ts_138104v160600p.pdf) (accessed 02.10.2024)

10. 3GPP TS 38.211 ver. 16.6.0 Release 16. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138200\\_138299/138211/16.06.00\\_60/ts\\_138211v160600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/16.06.00_60/ts_138211v160600p.pdf) (accessed 02.10.2024)

11. Barkhatov A. V., Veremyev V. I., Vorobev E. N., Konovalov A. A., Kovalev D. A., Kutuzov V. M., Mikhailov V. N. *Passivnaya kogerentnaya radiolokaciya* [Passive Coherent Radar]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2016, 163 p. (In Russ.)

12. Griffiths H. D., Baker C. J. *An Introduction to Passive Radar*. London, Artech House, 2017, 215 p.

13. Farhang-Boroujeny B. *Adaptive filters theory and applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom, John Wiley & Sons, 2013, 802 p.

14. Nascimento V. H., Silva M. T. M. Chapter 12. Adaptive Filters. Academic Press Library in Signal Processing. 2014, vol. 1, pp. 619–761. doi: 10.1016/B978-0-12-396502-8.00012-7

15. 3GPP TR 38.901 ver. 16.1.0 Release 16. Available at: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/138900\\_138999/138901/16.01.00\\_60/tr\\_138901v160100p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf) (accessed 02.10.2024)

### Information about the authors

**Nguyen Van Tuan**, Specialist in Specialty "Radioelectronic systems and complexes" (2021), postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 3 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; semi-active radar.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

E-mail: [hinhthien08@gmail.com](mailto:hinhthien08@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-5652-6111>

**Vladimir M. Kutuzov**, Dr Sci. (Eng.) (1997), Professor (1998) of the Department of Radio Engineering Systems, President of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 270 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia

E-mail: [vmkutuzov@etu.ru](mailto:vmkutuzov@etu.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3438-1361>

**Evgenii N. Vorobev**, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Senior Researcher at the Research Institute "Prognoz" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: passive radar, recognition of radar targets.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 F, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia

E-mail: [envorobev@etu.ru](mailto:envorobev@etu.ru)

<http://orcid.org/0000-0001-6637-2374>

---

## Особенности формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза

К. Халугарова , Ю. М. Спивак, В. А. Мошников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

 kamilya\_kh@mail.ru

### Аннотация

**Введение.** Пористые наночастицы оксидов металлов имеют большое научно-технологическое значение и широкий спектр применения. Для получения таких материалов применяются методы соосаждения, золь-гель, а также микроэмульсионные, гидротермальные, парофазные и другие методы. В настоящее время для синтеза пористых наночастиц оксидов металлов разрабатываются методы зеленого синтеза с применением экстрактов растений.

**Цель работы.** Разработка масштабируемой методики получения пористых наночастиц оксида никеля с высокой удельной площадью поверхности. Исследование особенностей формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза.

**Материалы и методы.** Методом зеленого синтеза с применением экстракта дымянки лекарственной получены наночастицы оксида никеля. Химический состав и микроструктура поверхности исследованы с помощью рентгенофазового анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Для исследования параметров полученной пористой структуры, таких, как удельная площадь поверхности, объем и размер пор, использовали метод тепловой десорбции и метод Брунауэра–Эммета–Теллера.

**Результаты.** Методом зеленого синтеза с применением экстракта растения получены крупные пористые агломераты размерами от нескольких до десятков микрометров. Показано, что изменением частоты центрифугирования можно варьировать удельную площадь поверхности структур (до значений  $S_{уд} = 130 \text{ м}^2/\text{г}$ ). Также показано, что удельной площадью поверхности частиц можно управлять температурой отжига. При выборе оптимальной температуры возможно полное (почти полное) удаление органических лигандов, стабилизирующих наночастицы. Предложена модель получения развитой пористой структуры при зеленом синтезе.

**Заключение.** Методом зеленого синтеза с применением экстракта дымянки лекарственной были получены иерархические пористые наночастицы оксида никеля, разработана методика получения этих наночастиц с высокой удельной площадью поверхности. Показано, что такие технологические параметры, как частота центрифугирования и температура отжига, существенно влияют на строение и удельную площадь поверхности пористых наночастиц оксида никеля. Системы из пористых наночастиц перспективны для применения в качестве катализаторов, адсорбентов, электродов и магнитных и фотоэлектрических материалов. Также такие агрегированные наночастицы перспективны для применения в инкорпорированных и инкапсулированных нанокомпозитах и для создания специализированных ростовых платформ.

**Ключевые слова:** зеленый синтез, оксид никеля, иерархические пористые наночастицы, оксид металла

**Для цитирования:** Халугарова К., Спивак Ю. М., Мошников В. А. Особенности формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 55–67. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-55-67

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022. <https://rscf.ru/project/23-42-10029/>.

**Благодарности.** Авторы благодарят Бобова Вячеслава Юрьевича (ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"») за помощь в измерениях методом сканирующей электронной микроскопии и Матвеева Василия Александровича (ПИЯФ им. Б. П. Константинова, НИЦ "Курчатовский институт") за помощь в измерениях методом рентгенофазового анализа.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; принята к публикации после рецензирования 10.10.2024; опубликована онлайн 27.12.2024



## Formation of Hierarchical Porous Nickel Oxide Nanoparticles by Green Synthesis

Kamilya Khalugarova✉, Yulia M. Spivak, Vyacheslav A. Moshnikov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ kamilya\_kh@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** Porous metal oxide nanoparticles are of great scientific and technological importance due to their wide range of applications. Such materials are obtained by co-deposition, sol-gel, microemulsion, hydrothermal, vapor-phase, etc., methods. Currently, porous metal oxide nanoparticles can be obtained by green synthesis from plant extracts.

**Aim.** Development of a scalable technique for obtaining porous nickel oxide nanoparticles with a high specific surface area. Investigation of the process of forming hierarchical porous nickel oxide nanoparticles by green synthesis.

**Materials and methods.** Nickel oxide nanoparticles were obtained by green synthesis using an extract of *Fumaria officinalis*, a medicinal plant. The chemical composition and surface microstructure were studied by X-ray phase analysis, scanning and transmission electron microscopy. The parameters of the resulting porous structure, such as specific surface area, volume, and pore size, were investigated by the methods of thermal desorption and BET.

**Results.** Large porous agglomerates ranging in size from several to tens of micrometers were obtained. It was shown that centrifugation rate can be used to vary the specific surface area of structures (up to values of  $S_{sa} = 130 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Annealing temperature can also be used to manage the specific surface area of particles. When an optimal temperature is selected, an almost complete removal of organic ligands that stabilize nanoparticles can be achieved. A model for obtaining a developed porous structure by green synthesis is proposed.

**Conclusion.** Hierarchical porous nickel oxide nanoparticles were obtained by the method of green synthesis using a *Fumaria officinalis* extract. A technique for obtaining porous nickel oxide nanoparticles with a high specific surface area was developed. It is shown that technological parameters, such as centrifugation rate and annealing temperature, affect significantly the structure and specific surface area of porous nickel oxide nanoparticles. Systems made of porous nanoparticles are promising for use as catalysts, adsorbents, and electrodes, as well as magnetic and photovoltaic materials. Such aggregated nanoparticles are also promising for use in incorporated and encapsulated nanocomposites, and for creating specialized growth platforms.

**Keywords:** green synthesis, nickel oxide, hierarchical porous nanoparticles, metal oxide

**For citation:** Khalugarova K., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A. Formation of Hierarchical Porous Nickel Oxide Nanoparticles by Green Synthesis. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 55–67. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-55-67

---

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Source of funding.** The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-42-10029 dated 12/20/2022. <https://rscf.ru/project/23-42-10029/>.

**Acknowledgments.** The authors thank Vyacheslav Yu. Bobov (State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC) for his help in measurements by scanning electron microscopy and Vasily A. Matveev (Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute") for his help in measurements by XRD analysis.

---

Submitted 02.09.2024; accepted 10.10.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Постоянно растущие современные технологические требования к миниатюризации устройств, увеличению каталитической эффективности, легкости и энергоэффективности привели к разработке и изучению наноматериалов, сочетающих свойства классических наноматериалов с низкой объемной плотностью и высокой площадью поверхности пористых наноматериалов. Наличие пористой текстуры с каналами и/или пустотами различных форм и размеров позволяет увеличивать удельную площадь поверхности, улучшать адсорбционные свойства, а также обеспечивает проницаемость/транспортировку жидкостей и/или газов. Кроме того, пористость способствует улучшению каталитической активности материала, в том числе и за счет роста площади взаимодействия, увеличения количества обрванных связей в поверхностных атомах и изменения количества соседей по сравнению с объемом. При этом возможен пиннинг уровня Ферми, а также изменение поверхностной энергии за счет кривизны поверхности [1–3].

Такие пористые наноматериалы, как, например, нанопористый<sup>1</sup> кремний, нанометаллические органические каркасы, нанопористые полимерные мембраны, нанопористые металлы и их оксиды, демонстрируют высокую гибкость конструкции. Это позволяет контролировать и варьировать их свойства посредством модификации поверхности или изменения структуры пор [4–8].

Пористые наночастицы оксидов металлов представляют собой новый класс наноматериалов, имеющий большое научное и технологическое значение и широкий спектр применения. К примеру, увеличенная площадь поверхности позволяет повысить дисперсность катализатора за счет более эффективного использования обычно дорогостоящих каталитических материалов. Кроме того, резкое искривление поверхно-

сти наночастиц приводит к повышению поверхностной энергии, что может способствовать росту реакционной способности или каталитической активности носителя и, следовательно, катализатора [9]. Традиционные методы получения пористых наночастиц оксидов металлов подразделяют на 3 типа:

- твердофазные (измельчение, обработка ультразвуком);
- жидкофазные (расплавленная соль, совместное осаждение, золь-гель, микроэмульсия, сольватермальные/гидротермальные, неводные);
- парофазные методы (пиролиз распылением, конденсация инертного газа) [10, 11].

Новый активно исследуемый способ получения пористых наночастиц оксидов металлов – метод зеленого синтеза [12, 13]. Он основан на реакции химического восстановления между вторичными метаболитами и солью металла. В табл. 1 приведено сравнение значений удельной площади поверхности пористых наночастиц оксида никеля, получаемых различными методами синтеза.

Из современных литературных источников известно, что таким методом можно получать наночастицы, но с менее развитой площадью поверхности по сравнению с классическими методами синтеза. В связи с этим актуальна задача развития методик зеленого синтеза пористых наночастиц металлов с увеличенной удельной площадью поверхности.

С этой точки зрения перспективна разработка технологических приемов и способов синтеза пористых наночастиц "снизу вверх" с иерархической структурой. Новые возможности таких наноматериалов обусловлены как наличием нескольких уровней иерархии структуры со своими характерными размерами, свойствами и функциональным назначением, так и характером взаимосвязей этих уровней, их фрактальностью, возможными синергетическими эффектами [14–23].

Таким образом, цель работы, описываемой в данной статье, – создание масштабируемой методики получения пористых наночастиц оксида никеля с высокой удельной площадью поверхности, а также изучение влияния технологических условий на строение иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза.

<sup>1</sup> В данном случае авторы используют термин "нанопористые", так как прежде всего хотят подчеркнуть наноразмерные особенности текстуры пористых материалов, включая наноразмерные сечения скелетной части пористой текстуры. Общепринято при классификации пористых материалов опираться на рекомендации международного общества IUPAC, в которых все пористые материалы делятся на микро-, мезо- и макропористые материалы.

Табл. 1. Значения удельной площади поверхности наночастиц оксида никеля, получаемые различными методами синтеза

Tab. 1. Specific surface area of nickel oxide nanoparticles obtained by various synthesis methods

| Методы                                                                         | $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г | Источник |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------|
| Классические методы:                                                           |                              |          |
| Гидротермальный синтез                                                         | 84.7                         | [24]     |
| Гидролиз                                                                       | 477.7                        | [25]     |
| Термическое разложение                                                         | 88.5                         | [26]     |
| Гидротермальный синтез                                                         | 40.3                         | [27]     |
| Гидротермальный синтез                                                         | 198.0                        | [28]     |
| Золь-гель-синтез                                                               | 112.0                        | [29]     |
| Электроспиннинг                                                                | 25.8                         | [30]     |
| Метод зеленого синтеза:                                                        |                              |          |
| Экстракт листьев <i>Croton macrostachyus</i> (широколистное кротоновое дерево) | 22.4                         | [31]     |
| Экстракт геля <i>Aloe vera</i> (алоэ)                                          | 40.9...58.4                  | [32]     |
| Экстракт <i>Spirogyra</i> sp. (спирогира)                                      | 16.7                         | [33]     |
| Экстракт растения <i>Capparis Spinosa</i> (каперсы колючие)                    | 3.7                          | [34]     |

**Материалы и методы.** Наночастицы оксида никеля получали методом зеленого синтеза. Для восстановления соли никеля и стабилизации синтезируемых наночастиц применялся экстракт дымянки лекарственной (*fumaria officinalis*) [35, 36]. Смешивались 30 мл  $NiSO_4$  (15 ммоль) с 10 мл экстракта растения с добавлением 2 %-го раствора  $NaOH$  для повышения уровня pH для активации реакции. Далее раствор помещался в ультразвуковую ванну на 30 мин. После обработки полученный осадок промывался дистиллированной водой для очищения от остатков реакции, центрифугировался при частоте от 3500 до 13 500 мин<sup>-1</sup> и сушился при 50 °С. Далее полученные частицы подвергались высокотемпературному отжигу в течение 30 мин при 300...500 °С.

Состав исследовался методом рентгеновского фазового анализа на дифрактометре Rigaku SmartLab 3 кВт с использованием рентгеновской трубки с медным анодом (CuK $\alpha$ ).

Морфологию полученных частиц исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (электронным микроскопом TESCAN MIRA3) и просвечивающей электронной микроскопии.

Для исследования параметров полученной пористой структуры, таких, как удельная площадь поверхности  $S_{уд}$ , объем и размер пор, использовались метод тепловой десорбции и метод Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) на приборе Сорби (ЗАО МЕТА) [37, 38].

**Результаты и обсуждение.** На рис. 1 представлены результаты рентгенофазового анализа. На рентгеновской дифрактограмме индици-

рованы рефлексы, соответствующие межплоскостным расстояниям 0.2414; 0.2089; 0.1477; 0.129; 0.1206 нм фазы оксида никеля NiO (II) [40].

Результаты исследования поверхности наночастиц NiO, полученных методом зеленого синтеза и подвергнутых высокотемпературной обработке, по данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) приведены на рис. 2. Как видно, полученные частицы имеют развитую пористую структуру, состоящую из разного размера частиц, пор и каналов. При этом размеры самих частиц примерно 30...50 нм.

Результаты просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для данного типа частиц представлены на рис. 3.

По результатам ПЭМ можно предположить, что наночастицы размером 1...5 нм представляют собой наименьший наблюдаемый структурный уровень иерархии. Такие частицы

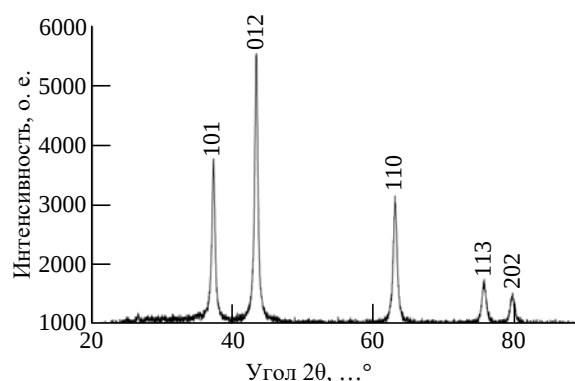


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма частиц оксида никеля, полученных методом зеленого синтеза

Fig. 1. X-ray diffractogram of nickel oxide particles obtained by green synthesis

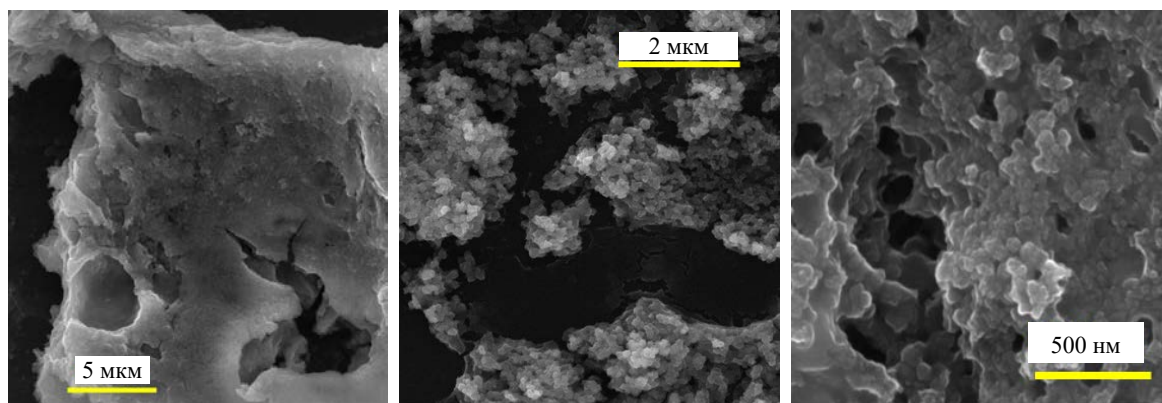


Рис. 2. СЭМ-изображения частиц оксида никеля, полученных методом зеленого синтеза

Fig. 2. SEM images of nickel oxide nanoparticles obtaining by green synthesis

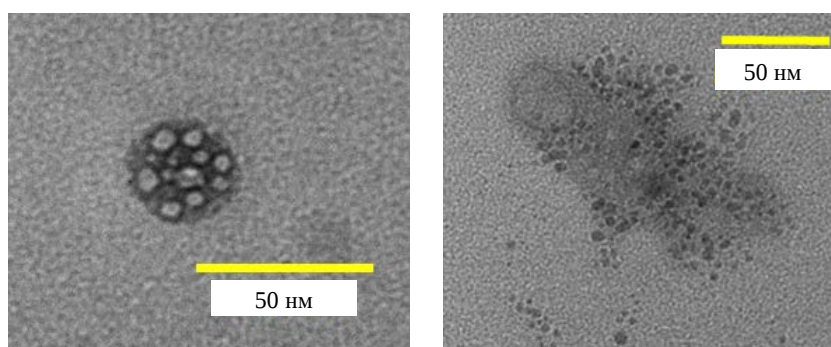


Рис. 3. ПЭМ-изображения частиц оксида никеля, полученных методом зеленого синтеза

Fig. 3. TEM images of nickel oxide nanoparticles obtaining by green synthesis

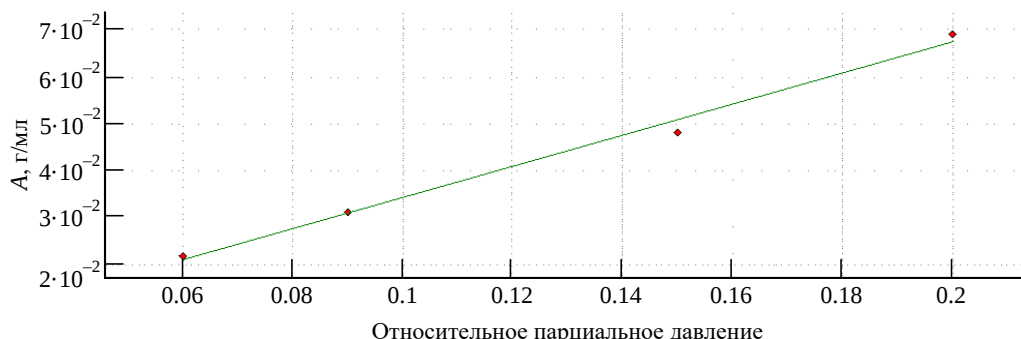


Рис. 4. График БЭТ для наночастиц оксида никеля, полученного методом зеленого синтеза

Fig. 4. BET graph for nickel oxide nanoparticles obtained by green synthesis

образуют пористые структурные элементы второго уровня 30...50 нм, из которых далее складывается следующий уровень иерархии пористых наночастиц оксида никеля, что коррелирует с данными СЭМ (рис. 2).

Наночастицы, отожженные при температуре 500 °С, были исследованы методом БЭТ для определения удельной площади поверхности. На рис. 4 представлен график уравнения БЭТ, где по оси ординат отложена величина  $A = \frac{p/p_0}{(1 - p/p_0)a}$ ,

соответствующая левой части уравнения БЭТ. По результатам исследования методом БЭТ удельная площадь поверхности составила  $130.7 \pm 6.7 \text{ м}^2/\text{г}$ . Сравнив это значение с данными табл. 1, можно отметить, что удалось превысить приведенные значения в несколько раз.

Далее для определения объема и распределения пор по размерам образцы исследовались методом тепловой десорбции. На графике полной изотермы адсорбции (рис. 5) присутствует гистерезис, что свидетельствует о наличии в образце капиллярной конденсации.

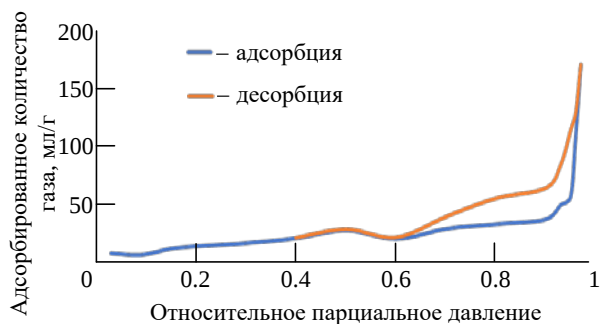


Рис. 5. Полная изотерма адсорбции исследуемого образца

Fig. 5. Total adsorption isotherm of a test sample

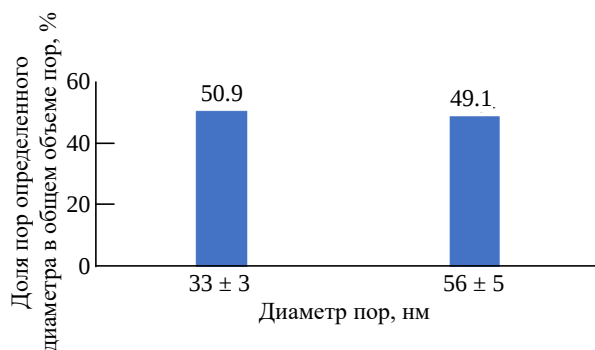


Рис. 6. Распределение пор по размерам по итогам исследования структуры методом тепловой десорбции

Fig. 6. Pore size distribution based on a study of the structure by thermal desorption

На рис. 6 приведена диаграмма распределения пор по размерам исследуемого образца. Видно, что для иерархии (дизайна) наночастиц характерны две группы размеров пор – диаметрами  $33 \pm 3$  и  $56 \pm 5$  нм. Доля первых составляет 50.9 % от общего объема пор, а доля пор диаметром 56 нм – 49.1 %. Более крупные макропоры следующего иерархического уровня (размерами свыше 50 нм), наблюдаемые по данным СЭМ (см. рис. 2), методом капиллярной конденсации не обнаруживаются, так как в макропорах процессы адсорбции-десорбции протекают по иному механизму, чем в микро- и мезопорах.

При изучении влияния технологических условий на строение иерархических пористых наночастиц оксида никеля значимыми факто-

рами эксперимента выявлены значения частоты центрифугирования на этапе очищения образцов от исходного раствора дистиллированной водой и температуры на этапе отжига.

Для исследования влияния частоты центрифугирования осадка на этапе промывания дистиллированной водой проводился ряд экспериментов при частотах центрифугирования 3500, 5500, 7500, 10 500, 13 500  $\text{мин}^{-1}$ . Промывание на каждой частоте длилось 10 мин и повторялось несколько раз. После отжига при температуре 500 °С образцы исследовались методом БЭТ на сорбтометре Сорби-М.

Результирующие значения удельной площади поверхности приведены в табл. 2.

На рис. 7 представлена зависимость удельной площади поверхности от частоты центрифугирования. Как видно из графика, удельная площадь поверхности возрастает до частоты центрифугирования 7500  $\text{мин}^{-1}$ , а при дальнейшем повышении частоты снижается и достигает определенного значения.

Для объяснения немонотонного поведения зависимости удельной площади поверхности от частоты центрифугирования, а также узкого

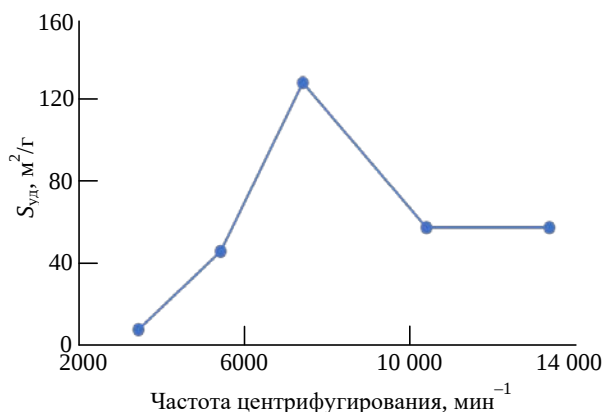


Рис. 7. Зависимость удельной площади поверхности от частоты центрифугирования

Fig. 7. Dependence of specific surface area on centrifugation rate

Табл. 2. Результаты полученных значение удельной площади поверхности в зависимости от частоты центрифугирования

Tab. 2. Values of specific surface area obtained under different centrifugation rate

| Частота центрифугирования, $\text{мин}^{-1}$ | Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$ |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 3500                                         | $8.6 \pm 0.2$                                       |
| 5500                                         | $47.2 \pm 2.7$                                      |
| 7500                                         | $130.7 \pm 6.7$                                     |
| 10 500                                       | $59 \pm 1.2$                                        |
| 13 500                                       | $58.8 \pm 1.2$                                      |

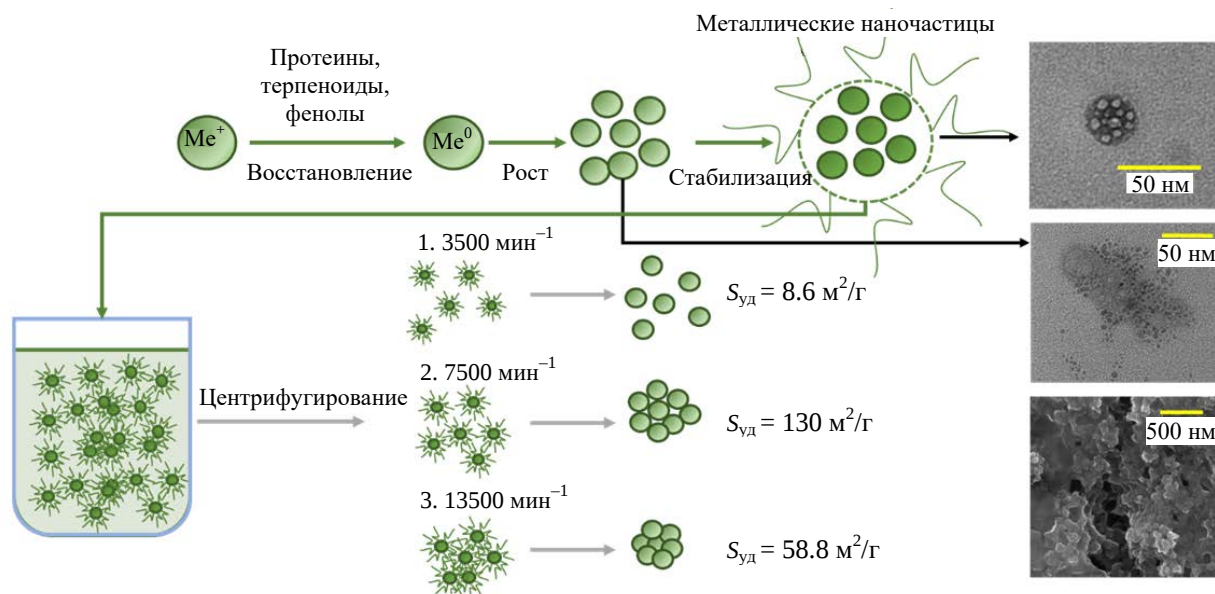


Рис. 8. Схема предполагаемой модели формирования частиц пористого оксида никеля с учетом влияния частоты центрифугирования

Fig. 8. Proposed model for the formation of porous nickel oxide particles, taking the influence of centrifugation rate into account

распределения мезопор по размерам была предложена модель формирования частиц пористого оксида никеля (рис. 8).

Предполагается, что на значение удельной площади поверхности частиц влияет наличие органических лигандов, являющихся стабилизаторами наночастиц на начальном этапе синтеза. Функциональные группы (такие, как  $-C-O-C-$ ,  $-C-O-$ ,  $-C=C-$ ), присутствующие во вторичных метаболитах растений, а также флавоноиды, алкалоиды, фенолы и др. служат стабилизаторами для предотвращения дальнейшего разрастания и агрегации получаемых наночастиц. Таким образом, наночастицы – структурные элементы первичного и вторичного уровней, стабилизированные такими функциональными группами, имеют закрепленные лиганды вокруг своего объема. При относительно небольших частотах центрифугирования (до  $5000 \text{ мин}^{-1}$ ) структура агрегата, формирующегося из таких структурных элементов, уплотняется недостаточно сильно, чтобы организовать пористую матрицу, а отжигом при  $500^\circ\text{C}$  лиганды удаляются с поверхности частиц, оставляя таким образом диспергированные неуплотненные частицы. При средних частотах (до  $10\,000 \text{ мин}^{-1}$ ) структура таких агрегатов уплотняется сильнее, и с дальнейшим

отжигом и удалением лигандов в ней образуются пустоты и наблюдается частичное спекание частиц. Это приводит к образованию укрупненных частиц с пористой структурой и с большой площадью поверхности. При очень высоких частотах ( $10\,000 \text{ мин}^{-1}$  и выше) лиганды проникают глубже в пространство между частицами и уменьшают расстояние между ними, тем самым значительно уплотняя структуру и уменьшая удельную площадь поверхности.

Исходя из изображений, полученных методом ПЭМ, и результатов распределения пор по размерам по данным исследования методом полной изотермы адсорбции (капиллярной конденсации) (рис. 8, вставка справа), как уже отмечалось, было выделено 2 низших структурных элементарных уровня, из которых формируются более крупные пористые частицы, и 2 вида мезопор, различающиеся в 2 раза по размерам. При этом предполагается, что структура оксида никеля формируется за счет последовательного соединения квазисферических частиц. Наиболее близкой к формируемому типу частиц является модель фрактального агрегата Жюльена (рис. 9) [41].

В трехмерном случае идеализированная модель фрактала Жюльена, представляющая собой сборку из равных по размерам началь-

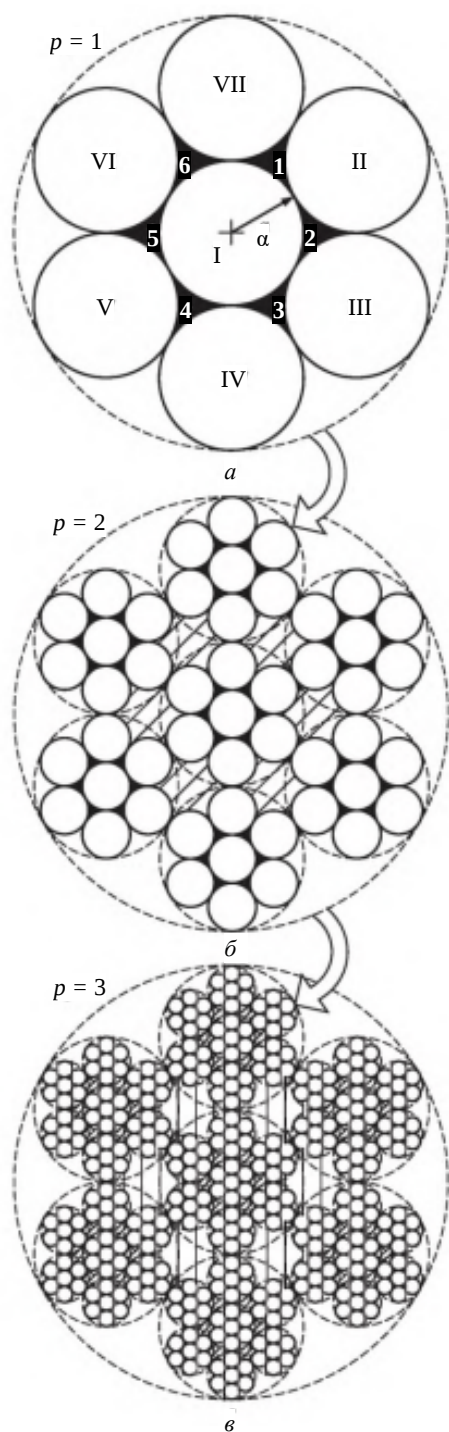


Рис. 9. Квазидвумерная проекция трехмерного детерминированного фрактального агрегата Жюльена: а – первая итерация; б – вторая итерация; в – третья итерация [41]

Fig. 9. Quasi-two-dimensional projection of a three-dimensional deterministic fractal Julien aggregate: а – first iteration; б – second iteration; в – third iteration

ных частиц, дополняется тремя частицами в верхнем слое и тремя частицами в нижнем. Таким образом, фрактальная размерность Хаус-

дорфа–Безиковича в двумерном варианте  $D = \ln 7 / \ln 3$ , а в трехмерном  $D = \ln 13 / \ln 3$  [42].

Сборка полученных наночастиц в условиях, когда размеры пор могут определяться по гистерезису капиллярной конденсации, качественно подтверждает модель формирования пористой структуры по кластер-кластерной агрегации. Размеры частиц первого уровня оксида никеля составляют примерно 2...5 нм. Размер иерархических наночастиц  $\approx 30...50$  нм. Разброс размеров наночастиц свидетельствует о более сложных механизмах, чем в идеализированной схеме строения фрактала Жюльена. Это связано не только с кластер-кластерной агрегацией, но и с возможностью продолжения процессов сборки "частица-кластер", с проникновением и диффузией в поры, с характером ориентированного сращивания (oriented attachment) [43] из-за влияния частоты центрифугирования и температуры отжига на лигандную оболочку.

Для исследования влияния температуры итогового отжига на удельную площадь поверхности была получена серия порошков, прошедших температурную обработку при 300, 400 и 500 °С. Результирующие значения удельных площадей поверхности приведены в табл. 3.

Табл. 3. Значения удельной площади поверхности при разной температуре отжига

Tab. 3. Value of specific surface area obtained under different annealing temperatures

| Температура отжига, °С | Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г |
|------------------------|-------------------------------------------------|
| 300                    | 9.0 ± 0.3                                       |
| 400                    | 47.2 ± 2.7                                      |
| 500                    | 130.7 ± 6.7                                     |

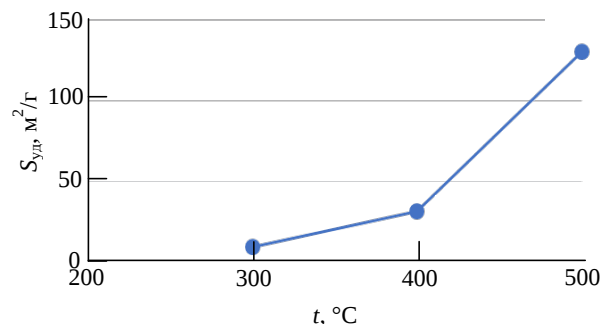


Рис. 10. Зависимость удельной площади поверхности от температуры отжига

Fig. 10. Dependence of specific surface area on annealing temperature

Зависимость удельной площади поверхности от температуры отжига представлена на рис. 10.

Исходя из полученных данных, можно предположить, что, как и в случае обработки методом центрифугирования, на удельную площадь поверхности влияет степень удаления лигандов из структуры наночастиц. При этом стоит отметить, что термообработки при температуре 300 °С в течение часа недостаточно и лиганды удаляются либо в малом количестве, либо не удаляются вовсе. Повышение температуры до 400 °С при термообработке в течение 1 ч приводит к получению значения удельной площади поверхности, в 3 раза превышающего значение при 300 °С. Это свидетельствует о частичном удалении лигандов с поверхности частиц. При повышении температуры до 500 °С достаточно термообработки в течение 30 мин для полного (почти полного) удаления стабилизирующих лигандов с поверхности частиц, что приводит к образованию после них свободных полостей (пор) в большом количестве и повышению удельной площади поверхности.

**Заключение.** В статье описано получение иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза. Была разработана методика получения пористых наночастиц с высокой удельной площадью поверхно-

сти (до 130 м<sup>2</sup>/г). Показано, что такие технологические параметры, как частота центрифугирования и температура отжига, существенно влияют на строение и удельную площадь поверхности пористых наночастиц оксида никеля. Исследование строения пористых наночастиц оксида никеля методами СЭМ и ПЭМ позволило выявить иерархическую структуру частиц с размерами структурных элементов первого (2...5 нм) и более высоких уровней (30...50 нм) и диаметром пор  $33 \pm 3$  и  $56 \pm 5$  нм. Приближение, описывающее образование систем с дискретными по размерам порами, коррелирует с моделью сборки фрактальных агрегатов по Жюльену с учетом особенностей реального эксперимента.

Системы из пористых наночастиц перспективны для применения в качестве катализаторов, адсорбентов, электродов и магнитных и фотоэлектрических материалов. Кроме того агрегированные наночастицы перспективны для использования в инкорпорированных и инкапсулированных нанокompозитах, а также при создании специализированных ростовых платформ. В целом наноархитектоника с иерархическими дискретными пористыми системами представляет интерес для создания наноприборов нового поколения с распределенными различными функциями пористых каналов.

### Список литературы

1. Porous Inorganic Nanomaterials: Their Evolution towards Hierarchical Porous Nanostructures / A. Jose, T. Mathew, N. Fernández-Navas, C. J. Querebillo // *Micro*. 2024. Vol. 4, № 2. P. 229–280. doi: 10.3390/micro4020016
2. Bridging the Gap Between Single Atoms, Atomic Clusters and Nanoparticles in Electrocatalysis: Hierarchical Structured Heterogeneous Catalysts / D. Bhalthia, A. Beniwal, P. K. Saravanan, P.-C. Chen, T.-Y. Chen // *ChemElectroChem*. 2024. Vol. 11, iss. 10. P. e202400034. doi: 10.1002/celec.202400034
3. Gerber I. C., Serp P. A theory/experience description of support effects in carbon-supported catalysts // *Chemical Reviews*. 2019. Vol. 120, iss. 2. P. 1250–1349. doi: 10.1021/acs.chemrev.9b00209
4. Porous silicon with embedded metal oxides for gas sensing applications / V. A. Moshnikov, I. Gracheva, A. S. Lenshin, Yu. M. Spivak, M. G. Anchikov, V. V. Kuznetsov, J. M. Olchowik // *J. of non-crystalline solids*. 2012. Vol. 358, iss. 3. P. 590–595. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.017
5. Surface functionality features of porous silicon prepared and treated in different conditions / Yu. M. Spivak,

- S. V. Mjakin, V. A. Moshnikov, M. F. Panov, A. O. Belorus, A. A. Bobkov // *J. of Nanomaterials*. 2016. Vol. 2016, iss. 1. P. 2629582. doi: 10.1155/2016/2629582
6. Mai H. D., Rafiq K., Yoo H. Nano metal-organic framework-derived inorganic hybrid nanomaterials: synthetic strategies and applications // *Chemistry—A European J.* 2017. Vol. 23, iss. 24. P. 5631–5651. doi: 10.1002/chem.201604703
7. Notario B., Pinto J., Rodriguez-Perez M. A. Nanoporous polymeric materials: A new class of materials with enhanced properties // *Progress in Materials Science*. 2016. Vol. 78. P. 93–139. doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.02.002
8. Pal N. Nanoporous metal oxide composite materials: A journey from the past, present to future // *Advances in colloid and interface science*. 2020. Vol. 280. P. 102156. doi: 10.1016/j.cis.2020.102156
9. Nanocrystalline CeO<sub>2</sub> increases the activity of Au for CO oxidation by two orders of magnitude / S. Carrettin, P. Concepción, A. Corma, J. M. López Nieto, V. F. Puntes // *Angewandte Chemie International Edition*. 2004. Vol. 43, iss. 19. P. 2538–2540. doi: 10.1002/anie.200353570

10. Skandan G., Singhal A. Perspectives on the science and technology of nanoparticle synthesis // *Nanomaterials handbook*. 2006. P. 13–28. doi: 10.1201/9781420004014.ch2
11. Pt and Pd Nanoparticle Crystallization in the Sol-Gel-Derived Thin SiO<sub>2</sub> Films / N. Gubanova, V. Matveev, E. Grebenshchikova, D. Kirilenko, Y. Sazonova, O. Shilova // *Physchem*. 2023. Vol. 3, iss. 2. P. 259–269. doi: 10.3390/physchem3020018
12. Adelere I. A., Lateef A. A novel approach to the green synthesis of metallic nanoparticles: the use of agro-wastes, enzymes, and pigments // *Nanotechnology Reviews*. 2016. Vol. 5, iss. 6. P. 567–587. doi: 10.1515/ntrev-2016-0024
13. Green synthesis of nanoparticles and its potential application / I. Hussain, N. B. Singh, A. Singh, H. Singh, S. C. Singh // *Biotechnology Let.* 2016. Vol. 38. P. 545–560. doi: 10.1007/s10529-015-2026-7
14. Hierarchically porous materials: synthesis strategies and structure design / X.-Y. Yang, L.-H. Chen, Y. Li, J. C. Rooke, C. Sanchez, B.-L. Su // *Chemical Society Reviews*. 2017. Vol. 46, № 2. P. 481–558. doi: 10.1039/C6CS00829A
15. Бобков А. А., Кононова И. Е., Мошников В. А. Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2017. 202 с.
16. Hierarchically structured porous materials: synthesis strategies and applications in energy storage / L. Wu, Y. Li, Zh. Fu, B.-L. Su // *National science review*. 2020. Vol. 7, iss. 11. P. 1667–1701. doi: 10.1093/nsr/nwaa183
17. Chen L. H., Li Y., Su B. L. Hierarchy in materials for maximized efficiency // *National Science Review*. 2020. Vol. 7, iss. 11. P. 1626–1630. doi: 10.1093/nsr/nwaa251
18. Universal Murray's law for optimised fluid transport in synthetic structures / B. Zhou, Q. Cheng, Z. Chen, Z. Chen, D. Liang, E. A. Munro, G. Yun, Y. Kawai, J. Chen, T. Bhowmick, P. K. Kannan, L. G. Occhipinti, H. Matsumoto, J. W. Gardner, B.-L. Su, T. Hasan // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, № 1. Art. no. 3652. doi: 10.1038/s41467-024-47833-0
19. Kononova I., Kononov P., Moshnikov V. Step-by-step modeling and experimental study on the Sol-Gel porous structure of percolation nanoclusters // *Coatings*. 2023. Vol. 13, iss. 2. P. 449. doi: 10.3390/coatings13020449
20. The architectonics features of heterostructures for IR range detectors based on polycrystalline layers of lead chalcogenides / Yu. M. Spivak, I. E. Kononova, P. V. Kononov, V. A. Moshnikov, S. A. Ignat'ev // *Crystals*. 2021. Vol. 11, iss. 9. P. 1143. doi: 10.3390/cryst11091143
21. Maji S., Shrestha L. K., Ariga K. Nanoarchitectonics for hierarchical fullerene nanomaterials // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, iss. 8. P. 2146. doi: 10.3390/nano11082146
22. Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors / A. Bobkov, V. Luchinin, V. Moshnikov, S. Nalimova, Yu. Spivak // *Sensors*. 2022. Vol. 22, iss. 4. P. 1530. doi: 10.3390/s22041530
23. Ariga K. Progress in molecular nanoarchitectonics and materials nanoarchitectonics // *Molecules*. 2021. Vol. 26, iss. 6. P. 1621. doi: 10.3390/molecules26061621
24. Porous nanorods by stacked NiO nanoparticulate exhibiting corn-like structure for sustainable environmental and energy applications / V. Manjunath, S. Bimli, D. Singh, R. Biswas, P. N. Didwal, K. K. Halder, N. G. Deshpande, P. A. Bhobe, R. S. Devan // *RSC advances*. 2023. Vol. 13, iss. 32. P. 21962–21970. doi: 10.1039/D3RA03209D
25. Synthesis and electrochemical properties of mesoporous nickel oxide / W. Xing, F. Li, Z. Yan, G. Q. Lu // *J. of power sources*. 2004. Vol. 134, iss. 2. P. 324–330. doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.038
26. Farhadi S., Kazem M., Siadatnasab F. NiO nanoparticles prepared via thermal decomposition of the bis (dimethylglyoximate) nickel (II) complex: A novel reusable heterogeneous catalyst for fast and efficient microwave-assisted reduction of nitroarenes with ethanol // *Polyhedron*. 2011. Vol. 30, iss. 4. P. 606–613. doi: 10.1016/j.poly.2010.11.037
27. NiO nanorings and their unexpected catalytic property for CO oxidation / D. Wang, R. Xu, X. Wang, Y. Li // *Nanotechnology*. 2006. Vol. 17, № 4. P. 979. doi: 10.1088/0957-4484/17/4/023
28. Morphology effects on electrocatalysis of anodic water splitting on nickel (II) oxide / Z. Wu, M. Vagin, R. Boyd, B. Bakhit, G. Greczynski, M. Odén, E. M. Björk // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2022. Vol. 333. P. 111734. doi: 10.1016/j.micromeso.2022.111734
29. Pat. KR101635552B1 G01N27/3271. Nickel Oxide Nanostructures with High Surface Area and Its Application for Urease-based Biosensor. Publ. 01.07.2016.
30. Kundu M., Liu L. Electrospun porous nickel oxide nanofibers for high-performance electrochemical energy storage // *J. Nanosci. Let.* 2015. Vol. 5. P. 11–18.
31. Etefa H. F., Nemera D. J., Dejene F. B. Green synthesis of nickel oxide NPs incorporating carbon dots for antimicrobial activities // *ACS omega*. 2023. Vol. 8, iss. 41. P. 38418–38425. doi: 10.1021/acsomega.3c05204
32. Green synthesis of NiO nanoparticles using Aloe vera gel extract and evaluation of antimicrobial activity / B. Ahmad, M. I. Khan, M. A. Naeem, A. Alhodaib, M. Fatima, M. Amami, E. A. Al-Abbad, A. Kausar, N. Alwadai, A. Nazir, M. Iqbal // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 288. P. 126363. doi: 10.1016/j.matchemphys.2022.126363
33. Biosynthesis of NiO nanoparticles using *Spirogyra* sp. cell-free extract and their potential biological applications / Y. Singh, R. S. Sodhi, P. P. Singh, S. Kaushal // *Materials Advances*. 2022. Vol. 3, iss. 12. P. 4991–5000. doi: 10.1039/D2MA00114D
34. Mohammed M., Alkhazraji A. H. Synthesis and Characterization of Nickel Oxide Nanoparticles by Green as well as Chemical Routes and Comparisons their Properties // *Iraqi J. of Natural Sciences and Nanotechnology*. 2023. Vol. 4, iss. 1. P. 54–63. doi: 10.47758/ijn.v4i0.92

35. Получение наночастиц никеля методом "зеленого" синтеза / К. Халугарова, А. С. Комолов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников, В. М. Кондратьев // Материалы науч.-техн. конф. "Микроэлектроника и информатика", Зеленоград, 20–21 апр. 2023 / Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники". М., 2023. С. 273–278.

36. Investigation of Particles Obtained by Green Synthesis Using Plant Extract / K. Khalugarova, V. M. Kondratev, A. Kuznetsov, A. Yu. Gagarina // Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), St Petersburg, Russia, 20 Nov. 2023. IEEE, 2023. P. 60–62. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424367

37. Maraeva E., Khalugarova K. Size analysis based on sorption study data for hydroxyapatite nanoparticles // Materials science forum. 2021. Vol. 1031. P. 172–177. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.172

38. Khalugarova K. N., Maraeva E. V., Moshnikov V. A. Study on the processes of nitrogen adsorption and capillary condensation in the powders of calcium hydroxyapatite // J. of Physics: Conf. Ser. 2019. Vol. 1400, iss. 3. P. 033003. doi: 10.1088/1742-6596/1400/3/033003

39. Everett D. H. Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units, Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry // Pure and Applied Chemistry. 1972. Vol. 31. P. 577–638. doi: 10.1351/pac197231040577

40. Richardson J. T., Scates R., Twigg M. V. X-ray diffraction study of nickel oxide reduction by hydrogen // Applied Catalysis A: General. 2003. Vol. 246, iss. 1. P. 137–150. doi: 10.1016/S0926-860X(02)00669-5

41. Кононова И. Е., Мошников В. А., Кононов П. В. Моделирование трехмерных пористых иерархических материалов, организованных посредством самосборки наносфер // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 54–63.

42. Золь-гель технология микро- и нанокомпози- тов / В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, Т. В. Хамова, О. А. Шилова. СПб.: Лань, 2013. 304 с.

43. Crystal growth by oriented attachment: kinetic models and control factors / X. Xue, R. L. Penn, E. R. Leite, F. Huang, Z. Lin // CrystEngComm. 2014. Vol. 16, iss. 8. P. 1419–1429. doi: 10.1039/C3CE42129E

### Информация об авторах

**Халугарова Камила** – аспирантка по направлению "Электроника, радиотехника и системы связи", младший научный сотрудник кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов: зеленый синтез; пористые материалы; наноструктуры.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: kamilya\_kh@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9569-7821>

**Спивак Юлия Михайловна** – доктор технических наук (2022), доцент (2015), доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов: получение и характеристика наноматериалов; пористый кремний; атомно-силовая микроскопия; тераностика; тонкопленочные нанотехнологии.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: ymkanageeva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5852-999X>

**Мошников Вячеслав Алексеевич** – доктор физико-математических наук (1997), профессор (1999), профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 900 научных работ. Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2007). Сфера научных интересов: коллоидные квантовые точки; золь-гель-технология; иерархические пористые материалы; биосенсоры; солнечные элементы; фотокатализаторы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vamosnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

### References

1. Jose A., Mathew T., Fernández-Navas N., Querebillo C. J. Porous Inorganic Nanomaterials: Their Evolution towards Hierarchical Porous Nanostructures. Micro. 2024, vol. 4, no. 2, pp. 229–280. doi: 10.3390/micro4020016

2. Bhalothia D., Beniwal A., Saravanan P. K.,

Chen P.-C., Chen T.-Y. Bridging the Gap Between Single Atoms, Atomic Clusters and Nanoparticles in Electrocatalysis: Hierarchical Structured Heterogeneous Catalysts. ChemElectroChem. 2024, vol. 11, iss. 10, p. e202400034. doi: 10.1002/celc.202400034

3. Gerber I. C., Serp P. A Theory/Experience De-

scription of Support Effects in Carbon-Supported Catalysts. Chemical Reviews. 2019, vol. 120, iss. 2, pp. 1250–1349. doi: 10.1021/acs.chemrev.9b00209

4. Moshnikov V. A., Gracheva I., Lenshin A. S., Spivak Yu. M., Anchkov M. G., Kuznetsov V. V., Olchowik J. M. Porous Silicon with Embedded Metal Oxides for Gas Sensing Applications. J. of Non-Crystalline Solids. 2012, vol. 358, iss. 3, pp. 590–595. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.017

5. Spivak Yu. M., Mjakin S. V., Moshnikov V. A., Panov M. F., Belorus A. O., Bobkov A. A. Surface Functionality Features of Porous Silicon Prepared and Treated in Different Conditions. J. of Nanomaterials. 2016, vol. 2016, iss. 1, p. 2629582. doi: 10.1155/2016/2629582

6. Mai H. D., Rafiq K., Yoo H. Nano Metal-Organic Framework-Derived Inorganic Hybrid Nanomaterials: Synthetic Strategies and Applications. Chemistry—A European J. 2017, vol. 23, iss. 24, pp. 5631–5651. doi: 10.1002/chem.201604703

7. Notario B., Pinto J., Rodriguez-Perez M. A. Nanoporous Polymeric Materials: A New Class of Materials with Enhanced Properties. Progress in Materials Science. 2016, vol. 78, pp. 93–139. doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.02.002

8. Pal N. Nanoporous Metal Oxide Composite Materials: A Journey from the Past, Present to Future. Advances in Colloid and Interface Science. 2020, vol. 280, p. 102156. doi: 10.1016/j.cis.2020.102156

9. Carrettin S., Concepción P., Corma A., López Nieto J. M., Puentes V. F. Nanocrystalline CeO<sub>2</sub> Increases the Activity of Au for CO Oxidation by Two Orders of Magnitude. Angewandte Chemie International Edition. 2004, vol. 43, iss. 19, pp. 2538–2540. doi: 10.1002/anie.200353570

10. Skandan G., Singhal A. Perspectives on the Science and Technology of Nanoparticle Synthesis. Nanomaterials handbook. 2006, pp. 13–28. doi: 10.1201/9781420004014.ch2

11. Gubanova N., Matveev V., Grebenshchikova E., Kirilenko D., Sazonova Y., Shilova O. Pt and Pd Nanoparticle Crystallization in the Sol-Gel-Derived Thin SiO<sub>2</sub> Films. Physchem. 2023, vol. 3, iss. 2, pp. 259–269. doi: 10.3390/physchem3020018

12. Adelere I. A., Lateef A. A Novel Approach to the Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: The Use of Agro-Wastes, Enzymes, and Pigments. Nanotechnology Reviews. 2016, vol. 5, iss. 6, pp. 567–587. doi: 10.1515/ntrev-2016-0024

13. Hussain I., Singh N. B., Singh A., Singh H., Singh S. C. Green Synthesis of Nanoparticles and Its Potential Application. Biotechnology Let. 2016, vol. 38, pp. 545–560. doi: 10.1007/s10529-015-2026-7

14. Yang X.-Y., Chen L.-H., Li Y., Rooke J. C., Sanchez C., Su B.-L. Hierarchically Porous Materials: Synthesis Strategies and Structure Design. Chemical Society Reviews. 2017, vol. 46, no. 2, pp. 481–558. doi: 10.1039/C6CS00829A

15. Bobkov A. A., Kononova I. E., Moshnikov V. A. *Materialovedenie mikro- i nanosistem. Ierarkhicheskie struktury* [Materials Science of Micro- and Nanosys-

tems. Hierarchical Structures]. St Petersburg, *izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2017, 202 p. (In Russ.)

16. Wu L., Li Y., Fu Zh., Su B.-L. Hierarchically Structured Porous Materials: Synthesis Strategies and Applications in Energy Storage. National Science Review. 2020, vol. 7, iss. 11, pp. 1667–1701. doi: 10.1093/nsr/nwaa183

17. Chen L. H., Li Y., Su B. L. Hierarchy in Materials for Maximized Efficiency. National Science Review. 2020, vol. 7, iss. 11, pp. 1626–1630. doi: 10.1093/nsr/nwaa251

18. Zhou B., Cheng Q., Chen Z., Chen Z., Liang D., Munro E. A., Yun G., Kawai Y., Chen J., Bhowmick T., Kannan P. K., Occhipinti L. G., Matsumoto H., Gardner J. W., Su B.-L., Hasan T. Universal Murray's Law for Optimised Fluid Transport in Synthetic Structures. Nature Communications. 2024, vol. 15, no. 1, art. no. 3652. doi: 10.1038/s41467-024-47833-0

19. Kononova I., Kononov P., Moshnikov V. Step-by-Step Modeling and Experimental Study on the Sol-Gel Porous Structure of Percolation Nanoclusters. Coatings. 2023, vol. 13, iss. 2, p. 449. doi: 10.3390/coatings13020449

20. Spivak Yu. M., Kononova I. E., Kononov P. V., Moshnikov V. A., Ignat'ev S. A. The Architectonics Features of Heterostructures for IR Range Detectors Based in Polycrystalline Layers of Lead Chalcogenides. Crystals. 2021, vol. 11, iss. 9, p. 1143. doi: 10.3390/cryst11091143

21. Maji S., Shrestha L. K., Ariga K. Nanoarchitectonics for Hierarchical Fullerene Nanomaterials. Nanomaterials. 2021, vol. 11, iss. 8, p. 2146. doi: 10.3390/nano11082146

22. Bobkov A., Luchinin V., Moshnikov V., Nalimova S., Spivak Yu. Impedance Spectroscopy of Hierarchical Porous Nanomaterials Based on Por-Si, Por-Si Incorporated by Ni and Metal Oxides for Gas Sensors. Sensors. 2022, vol. 22, iss. 4, p. 1530. doi: 10.3390/s22041530

23. Ariga K. Progress in Molecular Nanoarchitectonics and Materials Nanoarchitectonics. Molecules. 2021, vol. 26, iss. 6, p. 1621. doi: 10.3390/molecules26061621

24. Manjunath V., Bimli S., Singh D., Biswas R., Didwal P. N., Haldar K. K., Deshpande N. G., Bhobe P. A., Devan R. S. Porous Nanorods by Stacked NiO Nanoparticulate Exhibiting Corn-Like Structure for Sustainable Environmental and Energy Applications. RSC Advances. 2023, vol. 13, iss. 32, pp. 21962–21970. doi: 10.1039/D3RA03209D

25. Xing W., Li F., Yan Z., Lu G. Q. Synthesis and Electrochemical Properties of Mesoporous Nickel Oxide. J. of Power Sources. 2004, vol. 134, iss. 2, pp. 324–330. doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.038

26. Farhadi S., Kazem M., Siadatnasab F. NiO Nanoparticles Prepared via Thermal Decomposition of the Bis (Dimethylglyoximate) Nickel (II) Complex: A Novel Reusable Heterogeneous Catalyst for Fast and Efficient Microwave-Assisted Reduction of Nitroarenes With Ethanol. Polyhedron. 2011, vol. 30, iss. 4, pp. 606–613. doi: 10.1016/j.poly.2010.11.037

27. Wang D., Xu R., Wang X., Li Y. NiO Nanorings and Their Unexpected Catalytic Property for

CO Oxidation. *Nanotechnology*. 2006, vol. 17, no. 4, p. 979. doi: 10.1088/0957-4484/17/4/023

28. Wu Z., Vagin M., Boyd R., Bakhit B., Greczynski G., Odén M., Björk E. M. Morphology Effects on Electrocatalysis of Anodic Water Splitting on Nickel (II) Oxide. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2022, vol. 333, p. 111734. doi: 10.1016/j.micromeso.2022.111734

29. Pat. KR10163552B1 G01N27/3271. Nickel Oxide Nanostructures with High Surface Area and Its Application for Urease-based Biosensor. Publ. 01.07.2016.

30. Kundu M., Liu L. Electrospun Porous Nickel Oxide Nanofibers for High-Performance Electrochemical Energy Storage. *J. Nanosci. Let.* 2015, vol. 5, pp. 11–18.

31. Etefa H. F., Namera D. J., Dejene F. B. Green Synthesis of Nickel Oxide NPs Incorporating Carbon Dots for Antimicrobial Activities. *ACS Omega*. 2023, vol. 8, iss. 41, pp. 38418–38425. doi: 10.1021/acsomega.3c05204

32. Ahmad B., Khan M. I., Naeem M. A., Alhodaib A., Fatima M., Amami M., Al-Abbad E. A., Kausar A., Alwada'i N., Nazir A., Iqbal M. Green Synthesis of NiO Nanoparticles Using Aloe Vera Gel Extract and Evaluation of Antimicrobial Activity. *Materials Chemistry and Physics*. 2022, vol. 288, p. 126363. doi: 10.1016/j.matchemphys.2022.126363

33. Singh Y., Sodhi R. S., Singh P. P., Kaushal S. Biosynthesis of NiO Nanoparticles Using *Spirogyra* Sp. Cell-Free Extract and Their Potential Biological Applications. *Materials Advances*. 2022, vol. 3, iss. 12, pp. 4991–5000. doi: 10.1039/D2MA00114D

34. Mohammed M., Alkhazraji A. H. Synthesis and Characterization of Nickel Oxide Nanoparticles by Green as well as Chemical Routes and Comparisons their Properties. *Iraqi J. of Natural Sciences and Nanotechnology*. 2023, vol. 4, iss. 1, pp. 54–63. doi: 10.47758/ijn.v4i0.92

35. Khalugarova K., Komolov A. S., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A., Kondratev V. M. Obtaining Nickel Nanoparticles by Green Synthesis Method. *Proc of the conf. "Microelectronics and Computer Science"*, Zelenograd, 20–21 Apr. 2023. Moscow, *Natsional'nyi issle-*

*dovatel'skii universitet "Moskovskii institut elektronnoi tekhniki"*, 2023, pp. 273–278. (In Russ.)

36. Khalugarova K., Kondratev V. M., Kuznetsov A., Gagarina A. Yu. Investigation of Particles Obtained by Green Synthesis Using Plant Extract. *Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP)*, St Petersburg, Russia, 20 Nov. 2023. IEEE, 2023, pp. 60–62. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424367

37. Maraeva E., Khalugarova K. Size Analysis Based on Sorption Study Data for Hydroxyapatite Nanoparticles. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1031, pp. 172–177. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.172

38. Khalugarova K. N., Maraeva E. V., Moshnikov V. A. Study on the Processes of Nitrogen Adsorption and Capillary Condensation in the Powders of Calcium Hydroxyapatite. *J. of Physics: Conf. Ser.* 2019, vol. 1400, iss. 3, p. 033003. doi: 10.1088/1742-6596/1400/3/033003

39. Everett D. H. *Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units, Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry*. Pure and Applied Chemistry. 1972, vol. 31, pp. 577–638. doi: 10.1351/pac197231040577

40. Richardson J. T., Scates R., Twigg M. V. X-Ray Diffraction Study of Nickel Oxide Reduction by Hydrogen. *Applied Catalysis A: General*. 2003, vol. 246, iss. 1, pp. 137–150. doi: 10.1016/S0926-860X(02)00669-5

41. Kononova I. E., Moshnikov V. A., Kononov P. V. Modeling of Three-Dimensional Hierarchical Porous Materials Organized by Means of Nanosphere Self-Assembly. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2017, no. 5, pp. 54–63. (In Russ.)

42. Moshnikov V. A., Tairov Yu. M., Khamova T. V., Shilova O. A. Sol-Gel Technology of Micro- and Nanocomposites. *SPb, Izd. "Lan"*, 2013, 304 p. (In Russ.)

43. Xue X., Penn R. L., Leite E. R., Huang F., Lin Z. Crystal Growth by Oriented Attachment: Kinetic Models and Control Factors. *CrystEngComm*. 2014, vol. 16, iss. 8, p. 1419–1429. doi: 10.1039/C3CE42129E

### Information about the authors

**Kamiliya Khalugarova**, Postgraduate student in "Electronics, Radio Engineering and Communication Systems", Junior Researcher of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: green synthesis; porous materials; nanostructures.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: kamiliya\_kh@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9569-7821>

**Yulia M. Spivak**, Dr. Sci. (Eng.) (2022), Assistant Professor (2015), Assistant Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 170 scientific publications. Area of expertise: synthesis and characterization of nanomaterials; porous silicon; atomic force microscopy; theranostics; thin-film nanotechnology.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: ymkanageeva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5852-999X>

**Vyacheslav A. Moshnikov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (1997), Professor (1999), Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 900 scientific publications. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2007). Area of expertise: colloidal quantum dots; sol-gel technology; hierarchical porous materials; biosensors; solar cells; photocatalysts.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

## Особенности радиопоглощения и экранирования электромагнитного излучения тканями, модифицированными полипирролом и магнетитом, в диапазоне частот от 3.9 до 8 ГГц

А. Е. Щербаков ✉

ОАО "Завод Магнетон", Санкт-Петербург, Россия

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [a.e.shcherbakov@bk.ru](mailto:a.e.shcherbakov@bk.ru)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время композиционные материалы на основе электропроводящих полимеров находят широкое применение в различных областях. К сожалению, собственно электропроводящие полимеры имеют достаточно низкую механическую прочность, поэтому их применяют в виде композиционных материалов в сочетании с другими компонентами, обеспечивающими улучшенные базовые свойства, например механические. Отдельной ветвью развития подобных материалов стоит выделить композиционные материалы на основе текстиля, применяющиеся для экранирования электромагнитных волн. Ввиду низкой удельной плотности и, как следствие, небольшой массы, а также высокой эффективности поглощения данные материалы находят свое применение в сферах защиты человека от электромагнитного излучения.

**Цель работы.** Количественная оценка и анализ радиопоглощающих свойств двух- и трехкомпонентных текстильных композитов, присущих материалам вследствие наличия у них электропроводящих и магнитных характеристик.

**Материалы и методы.** Для измерения S-параметров использовался векторный анализатор цепей Keysight N5232A. Измерения проводились отдельно в двух диапазонах частот: 3.9...5.65 и 5.65...8 ГГц. Для выбранных диапазонов частот использовались волноводы с сечением  $48 \times 24$  и  $35 \times 15$  мм соответственно. В качестве экспериментальных образцов выступали композиционные материалы на основе нетканого текстиля, состоящего из вискозы и полиэфирного волокна в соотношении 60 и 40 % по массе соответственно.

**Результаты.** В ходе эксперимента определены параметры S11, характеризующие отражение волны от поверхности образца ( $S_r$ ) (reflection), и параметры S12, характеризующие проницаемость образца ( $S_t$ ) (transmittance). Получены данные для однослойных и многослойных образцов. Рассчитаны параметры диэлектрической и магнитной проницаемостей полученных материалов.

**Заключение.** Исследуемые материалы показали высокую степень как экранирования, так и поглощения электромагнитного излучения. Для образцов, содержащих магнетит, превалирует экранирующий характер электромагнитного излучения, для образцов на основе полипиррола основной характер взаимодействия поглощающий. Уровень общего поглощения образцов на основе полипиррола толщиной 6 мм составил 90 %. Полученные электрофизические параметры в дальнейшем возможно использовать при проектировании и моделировании радиопоглощающих изделий на основе исследуемого материала.

**Ключевые слова:** полипиррол, электропроводящие полимеры, радиопоглощающие материалы, магнетит, электромагнитные волны

**Для цитирования:** Щербаков А. Е. Особенности радиопоглощения и экранирования электромагнитного излучения тканями, модифицированными полипирролом и магнетитом, в диапазоне частот от 3.9 до 8 ГГц // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 68–79. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-68-79

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.09.2024; принята к публикации после рецензирования 24.10.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

## Radio Absorption and Shielding of Electromagnetic Radiation by Polypyrrole- and Magnetite-Based Textiles in the 3.9...8 GHz Frequency Range

Alexandr E. Scherbakov ✉

JSC "Zavod Magneton", St Petersburg, Russia

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ a.e.shcherbakov@bk.ru

### Abstract

**Introduction.** Composite materials based on electrically conductive polymers find application in various fields. However, the rather low mechanical strength of electrically conductive polymers require addition of other components to enhance their, e.g., mechanical properties. Another direction consists in the development of textile-based composite materials for shielding electromagnetic waves. Due to the low specific density and, respectively, low weight, as well as high absorption efficiency, such materials find application in the fields of human protection from electromagnetic radiation.

**Aim.** Quantitative assessment and analysis of the radio-absorbing properties of two- and three-component textile composites, which emerge due to their electrically conductive and magnetic characteristics.

**Materials and methods.**  $S$  parameters were measured using a Keysight N5232A vector circuit analyzer. Measurements carried out separately in two frequency ranges: 3.9...5.65 and 5.65...8 GHz. Waveguides of a given cross section were used for the selected frequency ranges (3.9...5.65 GHz –  $48 \times 24$  mm; 5.65...8 GHz –  $35 \times 15$  mm). The experimental samples were composite materials based on non-woven textiles consisting of viscose and polyester fiber in a ratio of 60 and 40 wt %, respectively.

**Results.** The  $S_{11}$  parameters characterizing wave reflection from the sample surface ( $S_r$ ) (reflection) and the  $S_{12}$  parameters characterizing the sample permeability ( $S_t$ ) (transmittance) were determined. Data for single- and multi-layered samples was obtained. The dielectric and magnetic permeability of the obtained materials was calculated.

**Conclusion.** The studied materials showed a high degree of both shielding and absorption of electromagnetic radiation. Magnetite-based samples demonstrated largely shielding properties against electromagnetic radiation; polypyrrole-based samples were characterized by absorbing properties. The total absorption level of 6-mm thick polypyrrole-based samples was 90 %. The obtained electrophysical parameters can be used when designing and modeling of radio-absorbing products based on the studied materials.

**Keywords:** polypyrrole, electrically conductive polymers, radio-absorbing materials, magnetite, electromagnetic waves

**For citation:** Scherbakov A. E. Radio Absorption and Shielding of Electromagnetic Radiation by Polypyrrole- and Magnetite-Based Textiles in the 3.9...8 GHz Frequency Range. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 68–79. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-68-79

**Conflict of interest.** The author declares no conflicts of interest.

Submitted 20.09.2024; accepted 24.10.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Электропроводящие полимеры (ЭПП) с сопряженной структурой цепей представляют собой органические высокомолекулярные полупроводники и обладают уникальным комплексом свойств: электропроводностью до уровня  $10^3$  См/см; окислительно-восстановительной активностью; парамагнетизмом; электрохромными и электромеханическими свойствами. В настоящее время компо-

зиционные материалы на основе ЭПП находят широкое применение в таких областях, как антистатические и антикоррозионные покрытия [1]; источники питания и преобразования энергии [2]; сенсорики; медицина [3, 4]; материалы для экранирования и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) [5, 6]. Основными преимуществами ЭПП и, как следствие, наноструктур на их основе следует выделить высо-

Особенности радиопоглощения и экранирования электромагнитного излучения тканями, модифицированными полипирролом и магнетитом, в диапазоне частот от 3.9 до 8 ГГц

Radio Absorption and Shielding of Electromagnetic Radiation by Polypyrrole- and Magnetite-Based Textiles in the 3.9...8 GHz Frequency Rang

кую стабильность, как химическую, так и термостойкость, а также отсутствие растворимости в каких-либо органических и водных средах. Недавние исследования показали, что полимеры биосовместимы на клеточном уровне и могут быть использованы в медицине [7, 8], следовательно, могут применяться в быту и безопасно контактировать с кожей и слизистыми оболочками животных и человека.

Стоит заметить, что классу ЭПП присуще интенсивное поглощение ЭМИ в видимой области спектра, ближней ИК-области, а также способность к поглощению в СВЧ-диапазоне. Это позволяет использовать полимеры в качестве экранов и адсорберов ЭМИ для защиты приборов и человека. К сожалению, собственно ЭПП имеют достаточно низкую механическую прочность, поэтому их применяют в виде композиционных материалов в сочетании с другими компонентами, обеспечивающими улучшенные механические характеристики, а также придающими материалам другие полезные свойства. Текстиль, модифицированный ЭПП, обладает всем перечисленным комплексом свойств, присущих полимерам, и может иметь широкий спектр применений от сенсорики и медицины до накопления и превращения энергии [9, 10].

В настоящее время получены разнообразные виды композиционных материалов ЭПП, в том числе и на основе текстиля [11–13].

Благодаря многофункциональности ЭПП (кислотно-основным и окислительно-восстановительным свойствам полимеров) разработаны химические методы получения более сложных, трех и четырехкомпонентных композитов, например материалов, модифицированных наночастицами благородных металлов [14] или оксидами редокс-активных переходных металлов [15]. Такие материалы используются для гетерогенного катализа или в сенсорах и электрохимических источниках питания.

Несмотря на большое количество композиционных материалов, свойства их значительно различаются, что зависит не только от состава, т. е. природы и количественного соотношения компонентов, но и от методов получения материалов. По этой причине получение новых композиционных материалов остается актуальной задачей.

Исходя из этого, на базе Института высокомолекулярных соединений РАН были разрабо-

таны два типа композиционных материалов: двухкомпонентный композитный текстиль, модифицированный электропроводящей формой полипиррола (ППи), и трехкомпонентный материал, содержащий еще и наночастицы магнетита ( $\text{Fe}^3\text{O}^4$ ). Полученные материалы сочетают в себе функциональные свойства активных компонентов (электропроводность, взаимодействие с ЭМИ, редокс-активность, магнетизм) и общие механические свойства ткани.

Таким образом, целью работы явилось исследование радиопоглощающих свойств двух- и трехкомпонентных текстильных композитов, присущих материалам вследствие наличия у них электропроводящих и магнитных характеристик.

Проведена качественная оценка свойств поглощения и экранирования ЭМИ в диапазоне частот 3.9...8 ГГц. Данный частотный диапазон выбран ввиду возможности экстраполяции полученных характеристик на более высокий частотный диапазон и моделирования свойств поглощения предполагаемых изделий в дальнейшем.

**Материалы и методы. Оборудование и расходные материалы.** В качестве метода анализа был выбран волноводный метод измерений. Выбранный метод, в отличие от распространенного рупорного метода, позволяет установить значения как магнитной и диэлектрических проницаемостей, так и других электрофизических параметров композиционных материалов при использовании NRW-метода (Nicolson–Ross–Weir) [16–18]. Выбор NRW-метода обуславливался простотой реализации алгоритма расчета электрофизических параметров материалов, также данный метод является предпочтительным при работе с материалами со сложной структурой.

Для измерения S-параметров используется векторный анализатор цепей Keysight N5232A. Измерения проводились отдельно в двух диапазонах частот: 3.9...5.65 и 5.65...8 ГГц. Для выбранных диапазонов частот использовались волноводы с сечением  $48 \times 24$  и  $35 \times 15$  мм соответственно.

**Экспериментальные образцы.** В качестве экспериментальных образцов выступали композиционные материалы на основе нетканого текстиля, состоящего из вискозы и полиэфирного волокна в соотношении 60 и 40 % по массе соответственно. Материал выбирался по принципу наибольшей эффективности осажде-

ния ЭПП. Также данный материал имел развитую структуру, способствующую лучшему согласованию волнового сопротивления объема образца и свободного пространства ввиду наличия достаточного объема воздуха между уложенными нитями ткани. Материалом-модификатором выступала окисленная форма электропроводящего ППи. Модификация ткани ППи проводилась путем гетерофазного синтеза полимера на поверхности текстиля. Дополнительная модификация двухкомпонентного композиционного материала магнитным компонентом в виде наночастиц магнетита, высаженных на поверхность ППи, проводилась методом соосаждения солей железа. Общий вид композиционных материалов представлен на рис. 1.

Полученные композиционные материалы нарезались на образцы размером  $48 \times 24$  и  $35 \times 15$  мм для соответствия сечению используемого волновода. В табл. 1 приведены значения толщин образцов и числа слоев модифицированной ППи ткани.

Данные, полученные в ходе измерения образцов, будут обозначены согласно приведенным в табл. 1.

*Технологический процесс и методика проведения эксперимента.* В ходе эксперимента определены параметры  $S_{11}$ , характеризующие отражение волны от поверхности образца ( $S_r$ ) (reflection), и параметры  $S_{12}$ , характеризующие проницаемость образца ( $S_t$ ) (transmittance).

Измерения проводились следующим образом. Образец размещался в измерительной ячейке, ко-

Табл. 1. Значения толщин и обозначения образцов

Tab. 1. Thickness values and sample designations

| Ткань, модифицированная |                  | Толщина, мм<br>(кол-во слоев) |
|-------------------------|------------------|-------------------------------|
| ППи                     | ППи и магнетитом |                               |
| 1.1                     | 2.1              | 2 (1)                         |
| 1.2                     | 2.2              | 4 (1)                         |
| 1.3                     | 2.3              | 4 (2)                         |
| 1.4                     | 2.4              | 6 (1)                         |
| 1.5                     | 2.5              | 6 (2)                         |
| 1.6                     | 2.6              | 6 (3)                         |
| 1.7                     | 2.7              | 7.5 (3)                       |

торая была соединена с волноводом прямоугольного сечения и коаксиально-волновым переходом (КВП), передающим сигнал от порта векторного анализатора. Схема размещения образца симметрична относительно плоскости образца для каждого из портов и представлена на рис. 2.

При определении  $S$ -параметров использовалась сборка волновода и КВП для каждого из портов. Для определения параметров полного поглощения, реализуемого при двойном прохождении электромагнитной волной объема поглотителя (SHORT), за измерительной ячейкой устанавливался металлический экран.

Для получения частотной зависимости электрофизических параметров, в частности диэлектрической и магнитной проницаемостей, полученные в рамках измерения  $S$ -параметры обрабатывались с помощью специально разработанного программного обеспечения, реализующего NRW-метод. При расчетах использовались следующие соотношения. Коэффициент отражения (KO) от образца рассчитывается по формуле



а



б

Рис. 1. Тканевый поглотитель на основе: а – вискозы и полипиррола; б – вискозы, полипиррола с добавлением магнетита

Fig. 1. Textile absorbent based on: а – viscose and polypyrrole; б – viscose, polypyrrole with the addition of magnetite

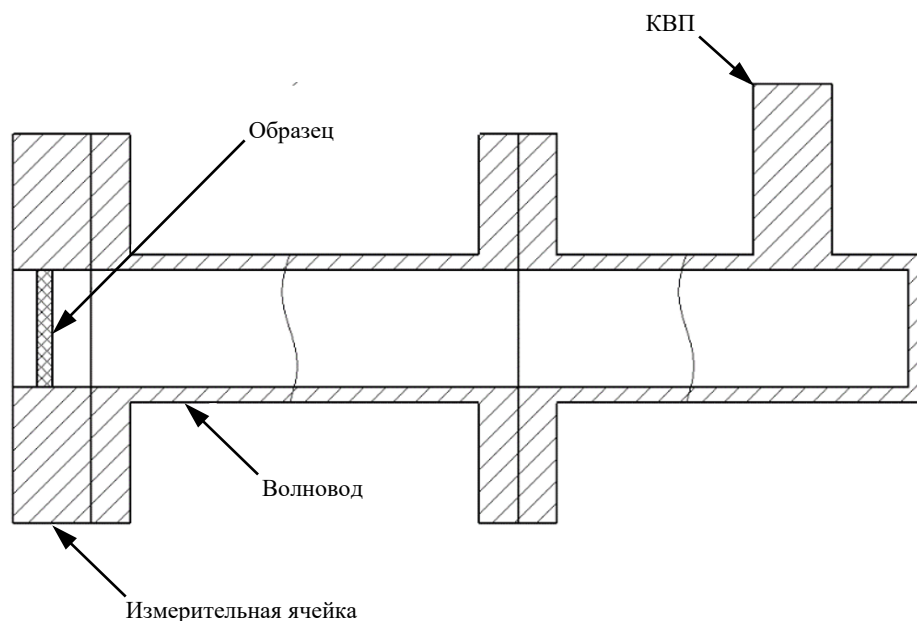


Рис. 2. Схема размещения образца  
Fig. 2. Sample placement diagram

$$KO = K \pm \sqrt{K^2 - 1}, \quad (1)$$

где  $K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{21}}$  – установочный коэффициент. Знак в (1) выбирается согласно условию  $|KO| \leq 1$ .

Далее вычисляется коэффициент прохождения (передачи) (КП):

$$КП = \frac{S_{11} - S_{12} - KO}{1 - (S_{11} + S_{21})KO}. \quad (2)$$

Затем рассчитываются комплексные магнитная и диэлектрическая проницаемости по формулам

$$\mu_r = \frac{1 + KO}{(1 - KO)\Lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[ \left( \frac{1}{\lambda_c^2} \right) - \left( \frac{1}{\Lambda^2} \right) \right]},$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве;  $\lambda_c$  – критическая длина волны в измерительном волноводе;  $\Lambda$  – коэффициент, определяемый выражением

$$\Lambda^2 = - \left[ \frac{1}{2\pi L} \ln \left( \frac{1}{КП} \right) \right]^2. \quad (4)$$

Здесь  $L$  – толщина образца.

Отдельно стоит отметить, что выражение (4) имеет бесконечное количество значений (мнимая часть КП рассчитана с точностью до  $2\pi n$ , где  $n$  – произвольное целое число). Поэтому для определения точных значений рассчитывается групповое время задержки сигнала при прохождении по волноводу для каждого  $n$ -го решения (3) и сравнивается с его действительным групповым временем задержки (4):

$$\tau_{g n} = L \frac{d}{df} \left( \frac{\mu_r \varepsilon_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right)^{1/2};$$

$$\tau_g = - \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{df},$$

где  $\varphi$  – фаза КП. Правильное значение  $n = k$  должно удовлетворять условию  $\tau_{g k} - \tau_g = 0$  [19].

**Результаты.** Результаты измерений параметров прохождения и отражения электромагнитных волн. На рис. 3 приведены частотные зависимости параметров  $S_t$  и  $S_r$  для однослойного текстиля различной толщины в диапазонах частот 3.9...5.65 и 5.65...8 ГГц.

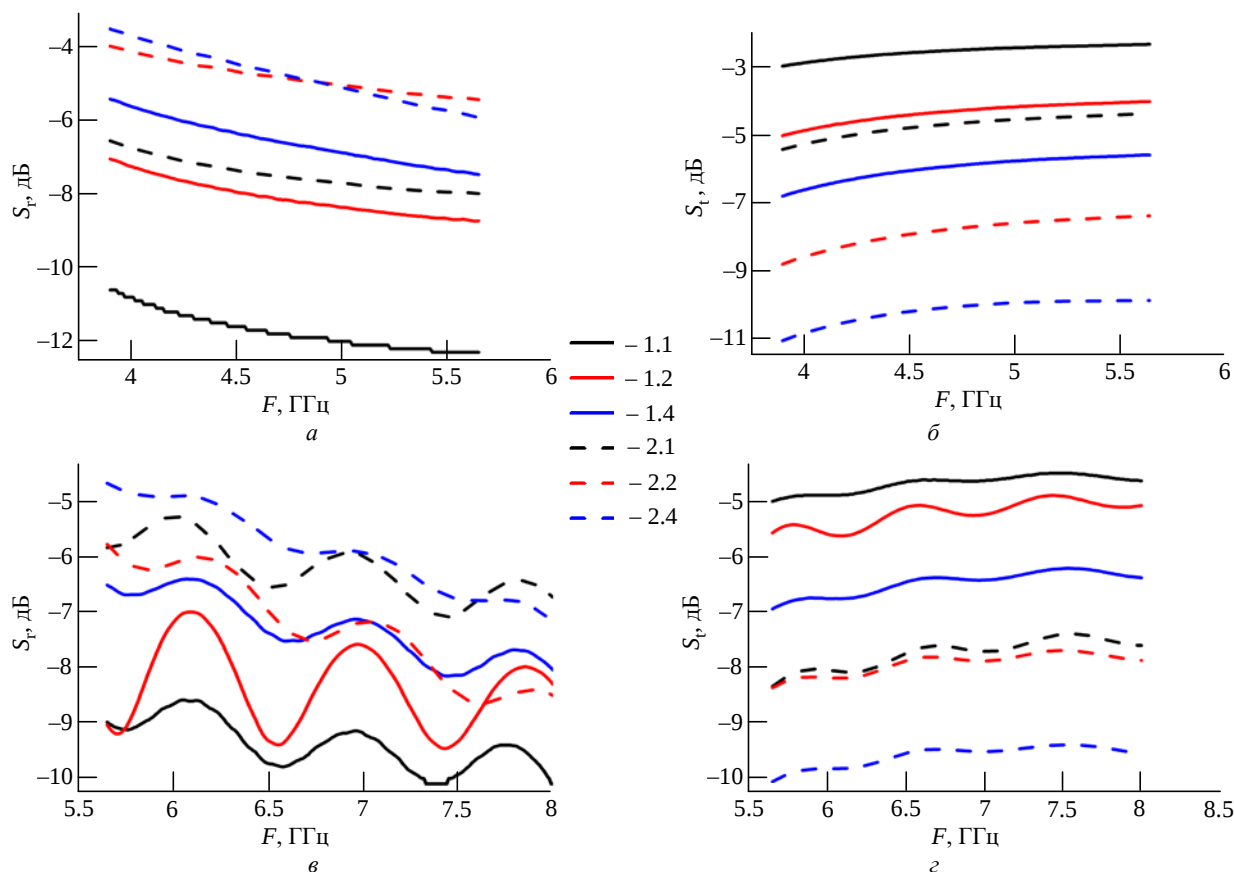


Рис. 3. Частотные зависимости параметров  $S_r(a, \epsilon)$  и  $S_t(b, z)$  для диапазонов:  $a, б$  – 3.9...5.65 ГГц;  $в, г$  – 5.65...8 ГГц (ППи – сплошные линии; ППи- $Fe_3O_4$  – штриховые линии)

Fig. 3. Frequency dependencies of  $S_r(a, \epsilon)$  and  $S_t(b, z)$  parameters for the bands:  $a, б$  – 3.9...5.65 GHz;  $в, г$  – 5.65...8 GHz (PPi – solid lines; PPi- $Fe_3O_4$  – dashed lines)

Полученные в ходе измерения образцов параметры материалов обозначены согласно табл. 1.

Видно, что проницаемость образцов для ЭМИ закономерно снижается с увеличением толщины композиционного текстиля. Это говорит о том, что с электромагнитным излучением взаимодействует весь объем образца даже при толщине текстиля 6 мм и существует резерв повышения его экранирующей способности за счет дальнейшего увеличения толщины. Нетканая матрица состоит из хаотически уложенных волокон, разделенных значительным свободным пространством. Благодаря свободному пространству улучшается согласование волнового сопротивления объема композиционного текстиля и свободного пространства вне образца, при этом электромагнитная волна способна взаимодействовать с большим объемом композиционного материала, вследствие чего с увеличением толщины общий показатель поглощения улучшается при незначительном росте отражающей способности материала.

Отдельно стоит выделить проявление эффекта осцилляции на образцах, измеренных в диапазоне частот 5.65...8 ГГц. Подобное поведение частотных зависимостей говорит о том, что в рамках данного диапазона проявляется эффект взаимодействия электромагнитной волны, по длине сопоставимой с размерами образца. Для получения характеристик диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов использовались данные, полученные на однослойных образцах толщиной 2 мм.

В результате измерений параметров (рис. 4, 5) для многослойных образцов можно наблюдать разбиение характеристик на группы, в большей степени зависящие от количества используемых слоев. Пример разбиения приведен на рис. 4 для диапазона частот 3.9...5.65 ГГц. В дальнейшем для восприятия будут отображены единичные представители количества слоев.

Подобное разбиение говорит о существенном вкладе имеющейся воздушной прослойки

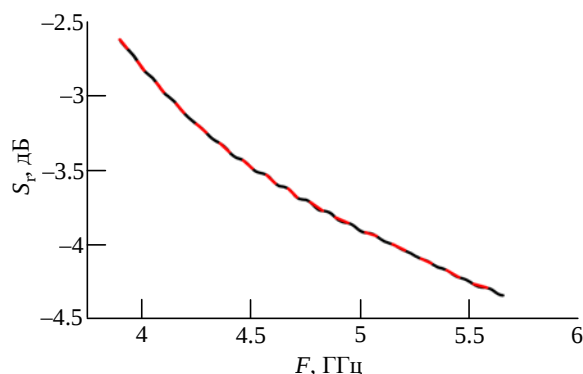


Рис. 4. Пример наложения графиков

Fig. 4. Example of superimposing graphs

между слоями материала. Имеет место эффект межслойного переотражения, который вносит более существенный вклад в механизм взаимодействия электромагнитной волны и объема образца, чем толщина материала. Эффект межслоевого отражения возникает за счет разницы волнового сопротивления свободного воздушного пространства  $Z$  и объема образца, опреде-

ляемого согласно формуле  $Z = (\mu/\epsilon)^{1/2}$ . Отдельно такое группирование материалов говорит об эффективности использования многослойных структур для экранирования ЭМИ. Подобный эффект также можно использовать при реализации градиентных структур поглотителей для увеличения эффективности при сохранении общей толщины материала.

Результаты расчета электрофизических параметров образцов. Полученные данные измерений  $S_t$  и  $S_r$  были пересчитаны в характеристики диэлектрической проницаемости при помощи NRW-метода. На рис. 6, а, б приведены частотные зависимости для  $\epsilon'$ , на рис. 6, в, г – для  $\mu'$ .

Зависимости, полученные в ходе исследования композиционных материалов в частотном диапазоне 5.65...8 ГГц, представляют большой интерес, значения диэлектрической проницаемости имеют нелинейный характер.

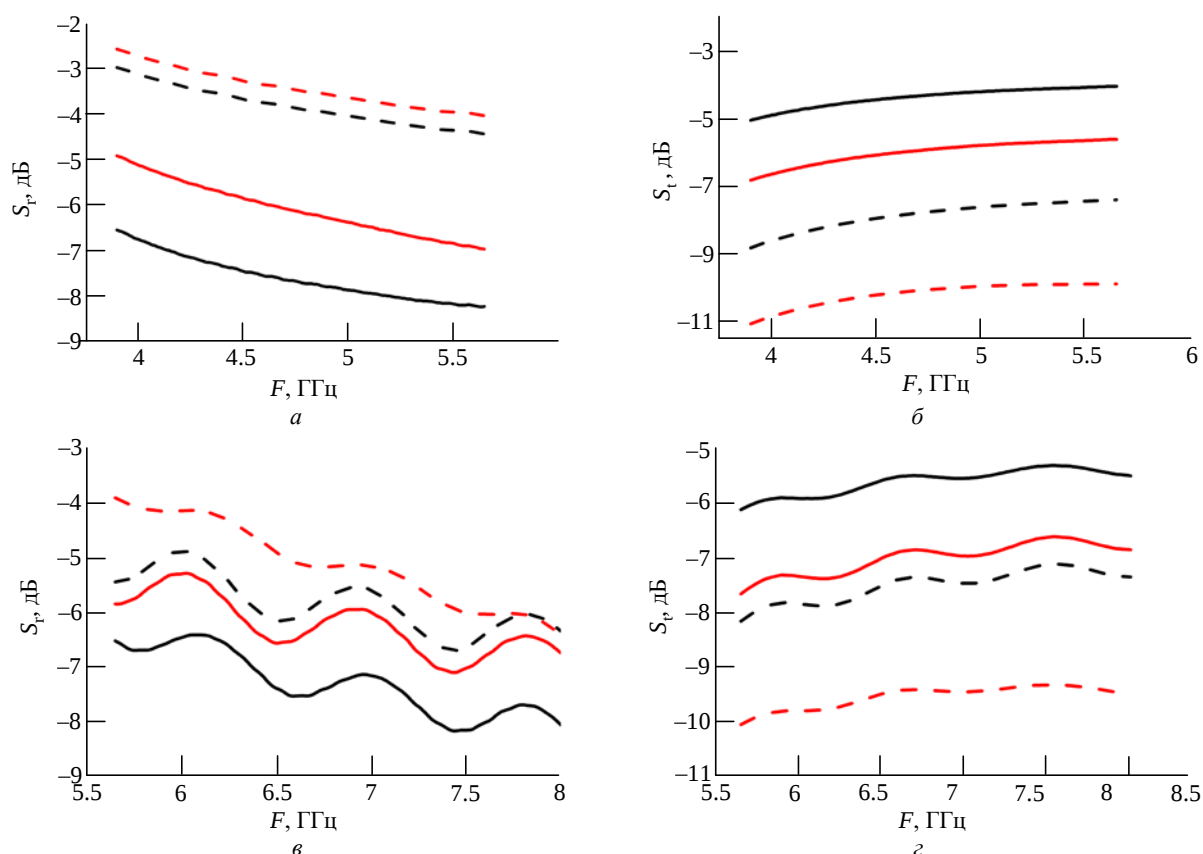


Рис. 5. Частотные зависимости параметров  $S_r$  (а, в) и  $S_t$  (б, г) многослойных образцов для диапазонов: а, б – 3.9...5.65 ГГц; в, г – 5.65...8 ГГц (ППИ – сплошные линии; ППИ- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – штриховые линии)

Fig. 5. Frequency dependencies of  $S_r$  (a, в) and  $S_t$  (б, г) parameters of multilayered samples for the bands: а, б – 3.9...5.65 GHz; в, г – 5.65...8 GHz (PPI – solid lines; PPI- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – dashed lines)

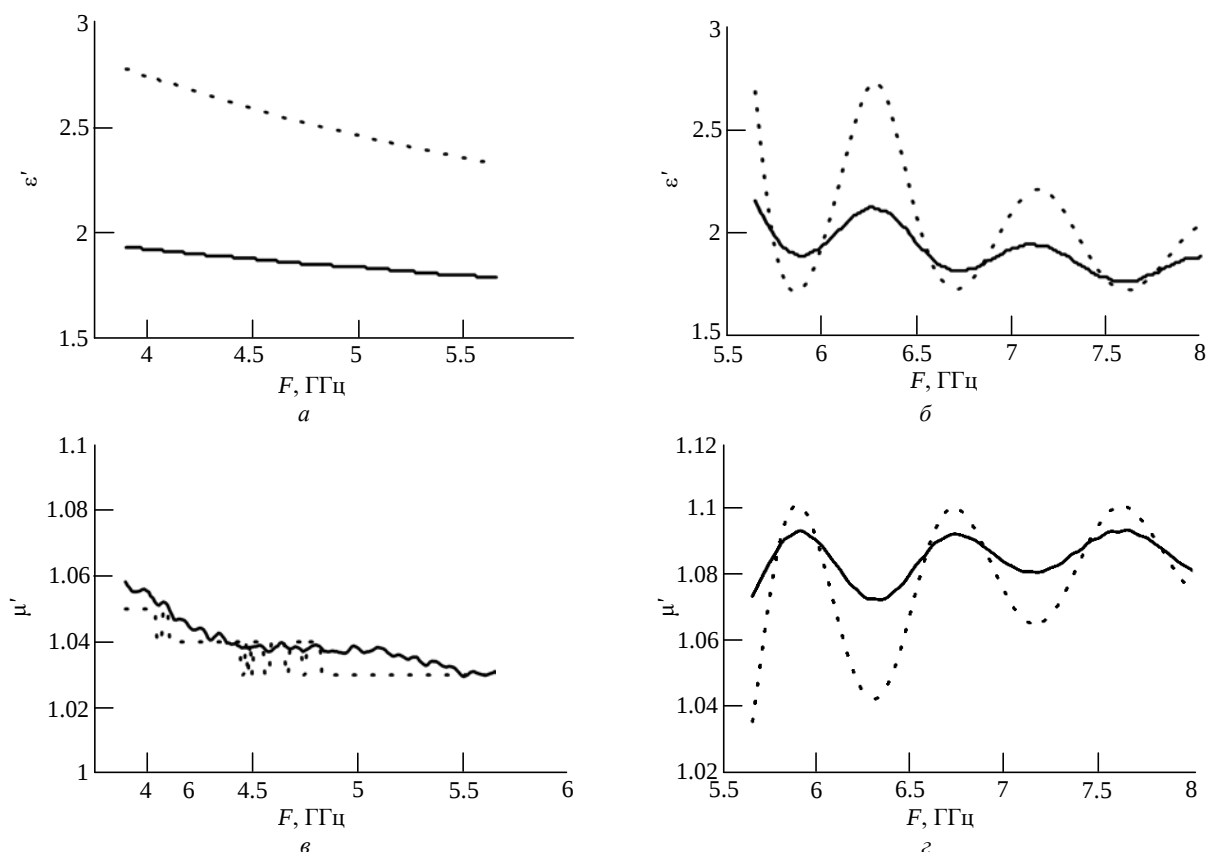


Рис. 6. Частотные зависимости параметров  $\varepsilon'$  (а, б) и  $\mu'$  (в, г) для диапазонов: а, в – 3.9...5.65 ГГц; б, г – 5.65...8 ГГц (ППи – сплошные линии; ППи- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – пунктирные линии)

Fig. 6. Frequency dependencies of  $\varepsilon'$  (a, б) and  $\mu'$  (в, г) for the bands: а, в – 3.9...5.65 GHz; б, г – 5.65...8 GHz (PPI – solid lines; PPI- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – dotted lines)

Ярко выраженная осцилляция для S-параметров также наблюдается и для параметров  $\varepsilon'$  и  $\mu'$ . Для образцов с содержанием магнетита амплитуда изменения параметров имеет больший диапазон. Зависимости имеют схожий характер поведения как для материала, содержащего ППи и магнетит, так и для содержащего только ППи. Общая совокупность зависимостей магнитной и диэлектрической проницаемостей влияет на общее увеличение волнового сопротивления образца, что, в свою очередь, приводит к изменению характера взаимодействия – с поглощения на экранирование для материалов, содержащих магнетит. Полученные результаты также возможно использовать для компьютерного моделирования и прогнозирования свойств поглощения сложных структур на основе полученного материала.

Результаты измерений параметров полного поглощения электромагнитных волн. На рис. 7 приведены параметры поглощения ЭМИ (K), реа-

лизующего при двойном прохождении электромагнитной волной объема композиционного материала разной толщины. Для сравнения параметры K приведены для коммерческого радиопоглощающего материала ПЭВ-Л толщиной 4 и 6 мм.

Видно, что как для образцов, содержащих ППи, так и для образцов, содержащих ППи и магнетит, во всем диапазоне частот коэффициент K непрерывно растет с увеличением толщины образцов. В то же время эффективность коммерческого поглотителя лимитирована толщиной 4 мм. Дальнейшее повышение K с ростом толщины невозможно из-за высокого волнового сопротивления объема материала, и, как следствие, увеличения его отражательной способности ЭМИ. Следует отметить, что в диапазоне частот 3.9...5.65 ГГц большим показателем K обладает материал на основе ППи и магнетита. Для диапазона 5.65...8 ГГц коэффициент поглощения K выше для образцов на основе ППи. На основе полученных данных можно говорить

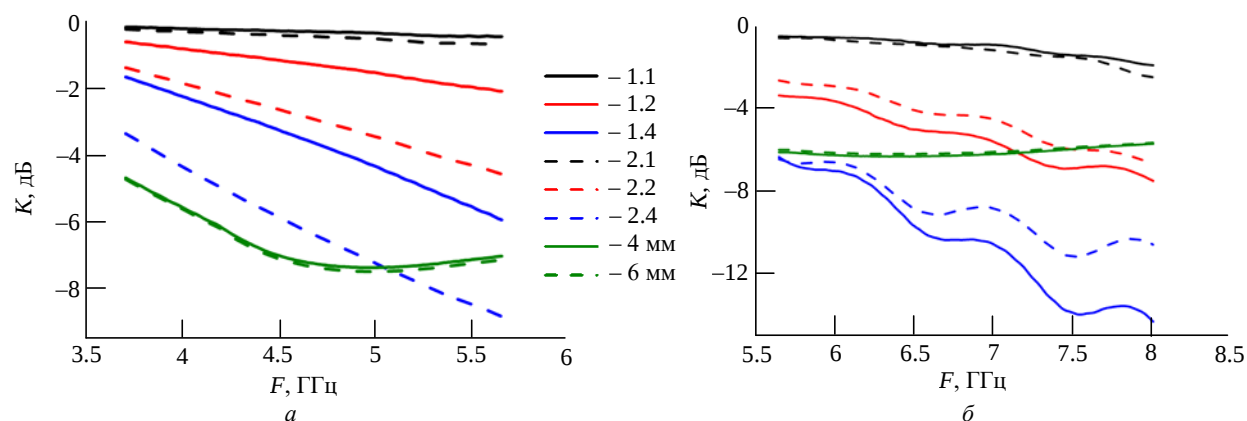


Рис. 7. Частотные зависимости параметров полного поглощения  $K$  для диапазонов:  $a$  – 3.9...5.65 ГГц;  $b$  – 5.65...8 ГГц  
Fig. 7. Frequency dependences of the total absorption parameters  $K$  for the ranges:  $a$  – 3.9...5.65 GHz;  $b$  – 5.65...8 GHz

о высоком уровне экранирования ЭМИ композиционным текстилем. Практически во всем диапазоне исследуемых частот коэффициент  $K$  образцов толщиной 6 мм превышает параметры коммерческих образцов толщиной 4 и 6 мм.

Говоря о преимуществах полученных материалов, необходимо учесть также, что плотность композиционного текстиля ( $1.2 \text{ г/см}^3$ ) в 3 раза ниже плотности коммерческого поглотителя на основе карбонильного железа ( $4 \text{ г/см}^3$ ). К тому же текстиль значительно превосходит ПЭВ-Л по комфорту за счет использования биосовместимых материалов и пористой, "дышащей", т. е. проницаемой для жидкостей и газов структуре. В диапазоне частот 6...8 ГГц композиционный текстиль снижает мощность ЭМИ более чем на 90 % и имеет тенденцию к увеличению не только экранирующей, но и поглощающей способности при больших частотах.

**Заключение и выводы.** Для анализа свойств взаимодействия ЭМИ и поглощающей ткани на основе ЭПП ППи, а также магнетита, на основе оксидов железа использован волноводный метод измерений, особенностью которого является возможность интерпретации получаемых  $S$ -параметров в параметры магнитной и диэлектрической проницаемостей с помощью NRW-метода. Были получены частотные зависимости параметров  $S_t$  и  $S_r$ , выявляющие характер взаимодействия материала с ЭМИ для образцов разной толщины и количества слоев. Так, для образцов, содержащих как ППи, так и магнетит, преобладает экранирующий характер взаимодействия с ЭМИ, что, в свою очередь, позиционирует его как материал, возможный для использова-

ния в качестве средства защиты человека от воздействия ЭМИ. Материал на основе ППи характеризуется большим уровнем поглощения ЭМИ. Подобный материал продемонстрировал тенденцию к увеличению толщины слоя и, как следствие, увеличению эффективности поглощения.

Отдельно стоит выделить многослойные материалы, которые пусть и не показали значительного увеличения показателей поглощения в зависимости от общей толщины образца, однако имели наиболее высокую экранирующую способность уже при использовании минимальных толщин. Подобное поведение может быть использовано как для увеличения показателей экранирования при прямом применении, так и при создании многослойных градиентных структур для увеличения показателей поглощения.

Полученные частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей позволяют применять компьютерное моделирование и прогнозирование свойств поглощения сложных структур на основе полученного материала.

Показатели полного поглощения  $K$ , реализуемого при двойном прохождении ЭМИ сквозь образец, показали снижение мощности ЭМИ более чем на 90 % для образцов на основе ППи. Общий характер взаимодействия имеет тенденцию к увеличению не только экранирующей, но и поглощающей способности при больших частотах и больших толщинах. В то же время для образцов коммерческого поглотителя потолок поглощающей способности остается на уровне 4 мм, тогда как материал на основе ППи имеет запас для увлечения толщины. Так, образцы толщиной 6 мм превышают параметры  $K$  коммерческих образцов толщиной 6 мм.

Отметим, что результаты данного исследования коррелируют со схожими результатами, полученными для подобных композитных материалов, при использовании другого типа матрицы носителя [11].

С учетом повышенной комфортности материала композиционный текстиль является перспективным для использования в сфере обеспечения защиты человека от негативного воздействия ЭМИ.

### Список литературы

1. The Effect of Conductive Polyaniline on the Anti-Fouling and Electromagnetic Properties of Polydimethylsiloxane Coatings / Y. Guo, Y. Qi, C. Zhang, S. Zhang, Z. Zhang // *Polymers*. 2023. Vol. 15, iss. 13. P. 2944. doi: 10.3390/polym15132944

2. Conductive polymers for stretchable supercapacitors / Y. Wang, Y. Ding, X. Guo, G. Yu // *Nano Research*. 2019. Vol. 12. P. 1978–1987. doi: 10.1007/s12274-019-2296-9

3. Rivers T. J., Hudson T. W., Schmidt C. E. Synthesis of a novel, biodegradable electrically conducting polymer for biomedical applications // *Advanced Functional Materials*. 2002. Vol. 12, iss. 1. P. 33–37. doi: 10.1002/1616-3028(20020101)12:1<33::AID-ADFM33>3.0.CO;2-E

4. Otero T. F., Martinez J. G., Arias-Pardilla J. Biomimetic electrochemistry from conducting polymers. A review: artificial muscles, smart membranes, smart drug delivery and computer/neuron interfaces // *Electrochimica Acta*. 2012. Vol. 84. P. 112–128. doi: 10.1016/j.electacta.2012.03.097

5. Development and investigation of electromagnetic shielding fabrics with different electrically conductive additives / V. Rubežienė, J. Baltušnikaitė, S. Varnaitė-Žuravlio, A. Sankauskaitė, A. Abraitienė, J. Matuzas // *J. of Electrostatics*. 2015. Vol. 75. P. 90–98. doi: 10.1080/00405000.2017.1347229

6. Layer by layer deposition of PEDOT, silver, and copper to develop durable, flexible, and EMI shielding and antibacterial textiles / S. Riaz, S. Naz, A. Younus, A. Javid, S. Akram, A. Nosheen, M. Ashraf // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. Vol. 650, art. № 129486. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129486

7. Yu Z., Zhen T., Jisheng H. 5-Block copolymer for skin-compatible electronics // *Semiconducting Polymer Materials for Biosensing Applications*. 2024. P. 125–161. doi: 10.1016/B978-0-323-95105-0.00009-7

8. Electrochemical control of bone microstructure on electroactive surfaces for modulation of stem cells and bone tissue engineering / D. Cao, J. Martinez, R. Anada, E. Hara, H. Kamioka, E. Jager // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2023. Vol. 24, iss. 1. Art. № 2183710. doi: 10.1080/14686996.2023.2183710

9. Sensing and Tactile Artificial Muscles from Reactive Materials / L. V. Conzuelo, J. Arias-Pardilla, J. Cauich-Rodríguez, M. A. Smit, T. F. Otero // *Sensors*. 2010. Vol. 10, iss. 4. P. 2638–2674. doi: 10.3390/s100402638

10. A flexible polypyrrole/silk-fiber ammonia sensor assisted by silica nanosphere template / C. She, G. Li, W. Zhang, G. Xie, Y. Zhang, L. Li, F. Yue, S. Liu,

Ch. Jing, Y. Cheng, J. Chu // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. Vol. 317. Art. № 112436. doi: 10.1016/j.sna.2020.112436.

11. Rybicki T., Stempień Z., Karbownik I. EMI Shielding and Absorption of Electroconductive Textiles with PANI and PPy Conductive Polymers and Numerical Model // *Energies*. 2021. Vol. 14, iss. 22. Art. № 7746. doi: 10.3390/en14227746

12. Electromagnetic Radiation Shielding by Composites of Conducting Polymers and Wood / I. Sapurina, N. Kazantseva, J. Prokes, P. Saga, J. Stejskal // *J. of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 95, iss. 4. P. 807–814. doi: 10.1002/app.21240

13. Recent advances in electromagnetic interference (EMI) shielding textiles: A comprehensive review / S. Akram, M. Ashraf, A. Javid, H. Affan-Abid, S. Ahmad, Y. Nawab, A. Rasheed, Zh. Xue, A. Nosheen // *Synthetic Metals*. 2023. Vol. 294. Art. № 117305. doi: 10.1016/j.synthmet.2023.117305

14. Sapurina I., Stejskal J. Composites of Multi-Wall Carbon Nanotubes, Polyaniline, and Noble-Metal Nanoparticles for Potential Application in Electrocatalysis // *Chemical Papers*. 2009. Vol. 63, iss. 5. P. 579–585. doi: 10.2478/s11696-009-0061-3

15. Polyaniline-coated multi-wall carbon nanotubes containing nickel nanoparticles / E. N. Konyushenko, N. E. Kazantseva, J. Stejskal, M. Trchová, J. Kovarova, I. Sapurina, M. M. Tomishko, O. V. Demicheva, J. Prokeš Konyushenko // *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008. Vol. 320, iss. 3–4. P. 231–240. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.05.036

16. Vicente A. N., Dip G. M., Junqueira C. The step by step development of NRW method // *SBMO/IEEE MTT-S Intern. Microwave and Optoelectronics Conf., Natal, Brazil, 29 Oct. 2011–01 Nov. 2011*. IEEE, 2011. P. 738–742. doi: 10.1109/IMOC.2011.6169318

17. Sadeghi S., Mousavi S. M., Pommerenke D. A Method to Determine the Permittivity of Anisotropic Thin Sheet Absorber Materials // *Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, 04–08 Sept. 2023*. IEEE, 2023. P. 1–6. doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274270

18. Rohde and Schwarz. Measurement of dielectric material properties. Application note. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/00aps\\_undefined/RAC-0607-0019\\_1\\_5E.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/00aps_undefined/RAC-0607-0019_1_5E.pdf) (дата обращения: 19.11.2024).

19. Лобекин В. Н., Татаренко А. С., Бичурин М. И. Методики измерения параметров метаструктур на основе сплит-кольцевых резонаторов // *Вестн. НовГУ. Сер. Технические науки*. 2020. № 5 (121). С. 25–28.

## Информация об авторе

**Щербаков Александр Евгеньевич** – магистр по специальности электроника и наноэлектроника (2021, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого), аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер-конструктор ОАО "Завод Магнетон". Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов: радиопоглощающие материалы; антенные технологии; электромагнитное излучение; технологии разработки и производства безэховых камер.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: a.e.shcherbakov@bk.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2219-2375>

## References

1. Guo Y., Qi Y., Zhang C., Zhang S., Zhang Z. The Effect of Conductive Polyaniline on the Anti-Fouling and Electromagnetic Properties of Polydimethylsiloxane Coatings. *Polymers*. 2023, vol. 15, iss. 13, p. 2944. doi: 10.3390/polym15132944
2. Wang Y., Ding Y., Guo X., Yu G. Conductive Polymers for Stretchable Supercapacitors. *Nano Research*. 2019, vol. 12, pp. 1978–1987. doi: 10.1007/s12274-019-2296-9
3. Rivers T. J., Hudson T. W., Schmidt C. E. Synthesis of a Novel, Biodegradable Electrically Conducting Polymer for Biomedical Applications. *Advanced Functional Materials*. 2002, vol. 12, iss. 1, pp. 33–37. doi: 10.1002/1616-3028(20020101)12:1<33::AID-ADFM33>3.0.CO;2-E
4. Otero T. F., Martinez J. G., Arias-Pardilla J. Biomimetic Electrochemistry from Conducting Polymers. A Review: Artificial Muscles, Smart Membranes, Smart Drug Delivery and Computer/Neuron Interfaces. *Electrochimica Acta*. 2012, vol. 84, pp. 112–128. doi: 10.1016/j.electacta.2012.03.097
5. Rubežienė V., Baltušnikaitė J., Varnaitė-Žuravliova S., Sankauskaitė A., Abraitienė A., Matuzas J. Development and Investigation of Electromagnetic Shielding Fabrics with Different Electrically Conductive Additives. *J. of Electrostatics*. 2015, vol. 75, pp. 90–98. doi: 10.1080/00405000.2017.1347229
6. Riaz S., Naz S., Younus A., Javid A., Akram S., Nosheen A., Ashraf M. Layer by Layer Deposition of PEDOT, Silver, and Copper to Develop Durable, Flexible, and EMI Shielding and Antibacterial Textiles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022, vol. 650, art. no. 129486. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129486
7. Yu Z., Zhen T., Jisheng H. 5-Block Copolymer for Skin-Compatible Electronics. *Semiconducting Polymer Materials for Biosensing Applications*. 2024, pp. 125–161. doi: 10.1016/B978-0-323-95105-0.00009-7
8. Cao D., Martinez J., Anada R., Hara E., Kamioka H., Jager E. Electrochemical Control of Bone Microstructure on Electroactive Surfaces for Modulation of Stem Cells and Bone Tissue Engineering. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2023, vol. 24, iss. 1, art. no. 2183710. doi: 10.1080/14686996.2023.2183710
9. Conzuelo L. V., Arias-Pardilla J., Cauch-Rodríguez J., Smit M. A., Otero T. F. Sensing and Tac-
- tile Artificial Muscles from Reactive Materials. *Sensors*. 2010, vol. 10, iss. 4, pp. 2638–2674. doi: 10.3390/s100402638
10. She C., Li G., Zhang W., Xie G., Zhang Y., Li L., Yue F., Liu S., Jing Ch., Cheng Y., Chu J. A Flexible Polypyrrole/Silk-Fiber Ammonia Sensor Assisted by Silica Nanosphere Template. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021, vol. 317, art. no. 112436. doi: 10.1016/j.sna.2020.112436.
11. Rybicki T., Stempień Z., Karbownik I. EMI Shielding and Absorption of Electroconductive Textiles with PANI and PPy Conductive Polymers and Numerical Model. *Energies*. 2021, vol. 14, iss. 22, art. no. 7746. doi: 10.3390/en14227746
12. Sapurina I., Kazantseva N., Prokes J., Saga P., Stejskal J. Electromagnetic Radiation Shielding by Composites of Conducting Polymers and Wood. *J. of Applied Polymer Science*. 2005, vol. 95, iss. 4, pp. 807–814. doi: 10.1002/app.21240
13. Akram S., Ashraf M., Javid A., Affan-Abid H., Ahmad S., Nawab Y., Rasheed A., Xue Zh., Nosheen A. Recent Advances in Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Textiles: A Comprehensive Review. *Synthetic Metals*. 2023, vol. 294, art. no. 117305. doi: 10.1016/j.synthmet.2023.117305
14. Sapurina I., Stejskal J. Composites of Multi-Wall Carbon Nanotubes, Polyaniline, and Noble-Metal Nanoparticles for Potential Application in Electrocatalysis. *Chemical Papers*. 2009, vol. 63, iss. 5, pp. 579–585. doi: 10.2478/s11696-009-0061-3
15. Konyushenko E. N., Kazantseva N. E., Stejskal J., Trchová M., Kovarova J., Sapurina I., Tomishko M. M., Demicheva O. V., Prokeš Konyushenko J. Polyaniline-coated Multi-Wall Carbon Nanotubes Containing Nickel Nanoparticles. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008, vol. 320, iss. 3–4, pp. 231–240. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.05.036
16. Vicente A. N., Dip G. M., Junqueira C. The Step by Step Development of NRW Method. *SBMO/IEEE MTT-S Intern. Microwave and Optoelectronics Conf., Natal, Brazil, 29 Oct. 2011–01 Nov. 2011. IEEE*, 2011, pp. 738–742. doi: 10.1109/IMOC.2011.6169318
17. Sadeghi S., Mousavi S. M., Pommerenke D. A Method to Determine the Permittivity of Anisotropic

Thin Sheet Absorber Materials. Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, 04–08 Sept. 2023. IEEE, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274270

18. Rohde and Schwarz. Measurement of dielectric material properties. Application note. Available at: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/)

dl\_application/00aps\_undefined/RAC-0607-0019\_1\_5E.pdf (accessed: 19.11.2024).

19. Lobekin V. N., Tatarenko A. S., Bichurin M. I. Methods for measuring the parameters of metastructures based on split-ring resonators. Vestnik NovSU. Iss.: Engineering Sciences. 2020, no. 5, pp. 25–28. (In Russ.)

#### Information about the author

**Alexandr E. Shcherbakov** – Master's degree in electronics and nanoelectronics (2021, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University), Postgraduate student of the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Design engineer of JSC "Magnetron Plant". Author of 5 scientific publications. Area of expertise: radio-absorbing materials; antenna technologies; electromagnetic radiation; technologies for the development and production of anechoic chambers.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: [a.e.shcherbakov@bk.ru](mailto:a.e.shcherbakov@bk.ru)

<https://orcid.org/0009-0006-2219-2375>

---

## Алгоритмическое обеспечение системы оценки воздействия дорожно-автомобильного комплекса на атмосферный воздух жилых территорий

Н. И. Куракина<sup>1✉</sup>, Р. А. Мышко<sup>1</sup>, Р. А. Бурдин<sup>1</sup>, Н. Ф. Денисова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Восточно-Казахстанский технический университет  
им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

✉ [nikurakina@etu.ru](mailto:nikurakina@etu.ru)

### Аннотация

**Введение.** Исследование посвящено разработке системы оценки экологического воздействия дорожно-автомобильного комплекса на загрязнение воздуха в городах. Актуальность работы определяется необходимостью создания принципиально новых подходов к оценке автотранспортного загрязнения воздуха городов, создания обобщенной геоинформационной модели городской территории, позволяющей определять зоны, подверженные воздействию загрязнения в большей степени с целью принятия решений, способствующих снижению загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге.

**Цель работы.** Разработка теоретических основ и программно-алгоритмического обеспечения геоинформационной системы моделирования загрязнения воздуха в условиях городской среды.

**Материалы и методы.** Применен математический аппарат теории измерений, теории систем, математического моделирования, обработки пространственных данных, объектно-ориентированного программирования.

**Результаты.** В соответствии с разработанными теоретическими основами создано программно-алгоритмическое обеспечение системы оценки загрязнения воздуха городской среды автомобильным транспортом, включающее модули подготовки исходных данных, построения пространственной модели дорожной сети, расчета эмиссии, производимой потоками автотранспорта, и моделирования распространения концентрации каждого загрязняющего вещества. Создана цифровая модель автотранспортного загрязнения жилых территорий Санкт-Петербурга.

**Заключение.** Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение послужит основой при создании цифровой карты загрязнения воздуха, которая может применяться в качестве эффективного инструмента при решении задач городского планирования и повышения комфортности городской среды в рамках реализации программы стратегического развития Санкт-Петербурга. Реализация цифровой модели в геоинформационной системе открывает большие возможности для оценки воздействия автотранспортного загрязнения на объекты жилой инфраструктуры, при этом в зависимости от перечня исходных данных, позволяет провести моделирование в различных погодных условиях и с различным сочетанием характеристик трафика для выявления наиболее опасных сочетаний факторов загрязнения.

**Ключевые слова:** загрязнение воздуха, автотранспорт, система оценки, моделирование, пространственная модель, метрологический анализ

**Для цитирования:** Алгоритмическое обеспечение системы оценки воздействия дорожно-автомобильного комплекса на атмосферный воздух жилых территорий / Н. И. Куракина, Р. А. Мышко, Р. А. Бурдин, Н. Ф. Денисова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 80–94. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-80-94

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.09.2024; принята к публикации после рецензирования 14.10.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

## Algorithmic Support for Environmental Impact Assessment of Road Transport Infrastructure on Atmospheric Air in Urban Areas

Natalia I. Kurakina<sup>1✉</sup>, Roman A. Myshko<sup>1</sup>, Rodion A. Burdin<sup>1</sup>, Natalya F. Denisova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup> D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

✉ nikurakina@etu.ru

### Abstract

**Introduction.** In this study, we develop a system for assessing the environmental impact of road transport on air quality in cities. The research relevance is determined by the need to create improved approaches to assessing air pollution in cities associated with the load of automobile transport. In this respect, a generalized geoinformation model for identifying the urban areas most exposed to pollution is required. This model can be used when developing measures aimed at improving the environmental situation in St Petersburg.

**Aim.** Development of theoretical foundations, as well as software and algorithmic support, with the purpose of creation of a geographic information system for modeling urban air pollution.

**Materials and methods.** The methods of measurement theory mathematics, systems theory mathematics, mathematical modeling, geoinformation data processing, and object-oriented programming were applied.

**Results.** Following the development of theoretical foundations, a software and algorithmic support complex for a system for assessing the level of air pollution in urban environments under the impact of road transport was created. This system includes the modules of initial data preparation, road network spatial modeling, calculation of pollutant emissions by vehicle flows, and modeling of the distribution of pollutant concentrations for each pollutant. A digital model of road transport pollution in the residential areas of St Petersburg was developed.

**Conclusion.** The developed software and algorithmic support can serve as the basis for development of a digital air pollution map. This map can be used when managing problems of urban planning and improving urban environment comfort as part of St Petersburg's strategic development program. The implementation of the developed digital model in the geographic information system of the city provides opportunities for assessing the impact of road pollution on residential infrastructure. Depending on the source data, including various weather and traffic conditions, the model can be used to identify the most dangerous combinations of pollution factors.

**Keywords:** air pollution, road transport, assessment system, modeling, spatial model, metrological analysis

**For citation:** Kurakina N. I., Myshko R. A., Burdin R. A., Denisova N. F. Algorithmic Support for Environmental Impact Assessment of Road Transport Infrastructure on Atmospheric Air in Urban Areas. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 80–94. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-80-94

**Conflict of interest** The authors declare no conflicts of interest

Submitted 10.09.2024; accepted 14.10.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Загрязнение атмосферного воздуха является одним из наиболее опасных факторов, воздействующих на здоровье людей. В крупных городах, таких как Санкт-Петербург, наблюдается увеличение концентрации загрязнителей, связанное с совершенствованием транспортной инфраструктуры. В соответствии с отчетом об экологической ситуации в Санкт-Петербурге за 2022 г.,

число транспортных средств в городе увеличилось на 14 % за последнее десятилетие, а суммарная эмиссия загрязняющих веществ (ЗВ), связанных с эксплуатацией автотранспорта, за год выросла на 3 % [1]. Автомобильно-дорожный комплекс в крупных городах является основным источником эмиссии загрязняющих веществ, включая канцерогенные твердые частицы. По этой причине за-

Алгоритмическое обеспечение системы оценки воздействия

дорожно-автомобильного комплекса на атмосферный воздух жилых территорий

Algorithmic Support for Environmental Impact Assessment

of Road Transport Infrastructure on Atmospheric Air in Urban Areas

дачи оценки и принятия решений, направленных на минимизацию загрязнения атмосферного воздуха в городах, являются актуальными.

Задача оценки загрязнения атмосферного воздуха в результате воздействия автотранспорта осложняется пространственной и временной неоднородностью влияющих факторов, главным образом характеристик трафика. В связи с этим непосредственное измерение уровней загрязнения с целью проведения экологического мониторинга является трудоемким и дорогостоящим. При этом анализ существующих моделей рассеяния показал, что зарубежные модели в значительной степени не учитывают российскую нормативную базу, связанную с оценкой загрязнения, не могут применяться в чистом виде и требуют значительной адаптации для применения в условиях российских городов [2]. В то же время в моделях в недостаточной степени учитывается загрязнение воздуха, связанное с эмиссией твердых частиц в результате износа самих транспортных средств (протекторов шин, тормозной системы) и дорожного полотна [3].

В силу указанных причин возникает задача формирования принципиально новых подходов к моделированию загрязнения воздуха, предполагающих создание пространственной модели, которая позволила бы определить территории Санкт-Петербурга, наиболее подверженные загрязнению воздуха, с целью улучшения экологической обстановки в городе.

Применение геоинформационных технологий в рамках разработки системы оценки автотранспортного загрязнения позволяет проводить автоматизированную комплексную оценку воздействия каждого объекта транспортной инфраструктуры на загрязнение воздуха, определять степень воздействия на жилые территории и наглядно отображать результаты оценки на карте.

Данное исследование будет полезным при решении задач, направленных на реализацию эффективной государственной политики в области защиты окружающей среды. Полученные научные результаты и разработанное алгоритмическое обеспечение могут быть применены в задачах городского планирования и проектирования объектов транспортно-дорожной инфраструктуры Санкт-Петербурга.

**Методы.** Оценка загрязнения воздуха связана, в первую очередь, с определением характеристик источников загрязнения и определением перечня факторов, которые оказывают воздействие на величину этого загрязнения. Основным оцениваемым параметром является концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе и факт превышения предельно допустимой величины, установленной нормативными документами. Пространственно неоднородный характер источников и значительное количество влияющих факторов, которые имеют место при оценке автотранспортного загрязнения, требуют особого подхода к организации и сбору исходных данных, необходимых для моделирования загрязнения. Таким образом, процедура оценки автотранспортного загрязнения состоит из нескольких этапов.

Первым этапом является построение пространственной модели дорожной сети на основе данных геометрии, конструктивных особенностей дорожной сети и характеристик трафика. Данная модель представляет собой совокупность элементов (дорожных перегонов), характеризующихся условно постоянным набором характеристик, влияющих на эмиссию загрязняющих веществ и рассматриваемых как источники загрязнения.

Следующим этапом является расчет эмиссии всех рассматриваемых загрязнителей для каждого источника, производимых потоком транспортных средств (ТС), движущимся по данному перегону.

На третьем этапе проводится моделирование рассеяния загрязняющих веществ на основе рассчитанных характеристик эмиссии, конфигурации и расположения источников, а также климатических условий, в результате чего формируются массивы значений концентрации загрязнителя для каждой точки пространства с заданным шагом.

На четвертом этапе осуществляется суммирование концентраций загрязняющих веществ для каждой точки исследуемой области с последующей оценкой превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) с целью определения территорий, подверженных большему загрязнению воздуха.

Заключительным этапом описанной процедуры является оценка достоверности получен-

ных результатов моделирования с учетом полноты и точности исходных данных.

#### **Пространственная модель дорожной сети.**

Одной из важнейших задач при разработке системы оценки распространения загрязнений, производимых дорожно-автомобильным комплексом, является организация структуры исходных данных. Среди факторов, влияющих на эмиссию загрязнителей, наибольшее влияние оказывают характеристики трафика. По этой причине именно характеристики трафика являются основой для формирования структуры данных. В статье предлагается использовать метод разбиения дорожной сети на элементарные участки – дорожные перегоны. Дорожный перегон представляет собой участок дороги, совокупность конструктивных характеристик, а также характеристик трафика, для которого может быть принята условно постоянной. В частности, состав потока, скорость и интенсивность движения изменяются в пределах перегона не более чем на 15 %.

Благодаря разбиению дорог на перегоны в значительной степени упрощается процедура формирования унифицированной структуры источников загрязнения. Становится возможным применение нормативных квазиэмпирических моделей рассеяния для оценки воздействия автотранспорта на атмосферный воздух городов [4].

Факторы, учитываемые при разбиении дорожной сети на перегоны, можно разделить на следующие группы:

1. Изменения геометрии дорожной сети (к данной категории относятся сочленения дорог: регулируемые и нерегулируемые перекрестки и примыкания дорог; локальные участки изменения геометрии дорожного полотна – расширения, сужения, соединения и разветвления). Данные объекты являются естественными границами дорожных перегонов и могут использоваться для первичного автоматизированного разбиения дорожной сети. В зависимости от характеристик трафика некоторые участки изменения геометрии могут не требовать разбиения дороги на перегоны. Например, нерегулируемое примыкание второстепенной дороги с более низкой интенсивностью движения не влияет на поток главной дороги или влияет незначительно.

2. Статические характеристики дорожного перегона. К данной категории относятся посто-

янные характеристики, имеющие отношение ко всему перегону: установленный скоростной режим; запрет движения грузовых транспортных средств; тип дорожного покрытия; наличие защитного экрана; факт, является ли перегон тоннелем или мостом, скоростной дорогой и т. п.

3. Динамические характеристики дорожного перегона. К данной категории относятся оперативные данные, характеризующие режим движения: например, если весь дорожный перегон занят автомобильной пробкой, требуется использовать алгоритм расчета выбросов загрязняющих веществ для стоящих транспортных средств. Также, если дорога перекрыта для движения на текущий момент в связи с ремонтом или общественным мероприятием, учет интенсивности не требуется.

Характер эмиссии загрязняющих веществ, производимых неподвижным транспортом с работающим двигателем, отличен и поэтому требует дополнительного учета. Наибольший интерес представляют периодические остановки транспортного потока на перекрестках и пешеходных переходах. Для каждого перегона определяется количество транспортных средств различных типов, находящихся в неподвижном состоянии  $S_1 \dots V$ , а также продолжительность периода остановки и число этих периодов за рассматриваемый промежуток времени.

Для каждого направления движения задается отдельный перегон. Для каждого перегона определяется кортеж параметров в соответствии с рассмотренными ранее характеристиками:

$$R_i = \{L, H, C, Z, N_p, W_p, v, P_b, T, G_1 \dots G_V, S_1 \dots S_V, P_c, N_c\},$$

где  $L$  – протяженность перегона, км;  $H$  – средняя высота перегона относительно уровня земли, м;  $C$  – тип дорожного покрытия;  $Z$  – характер изоляции перегона;  $N_p$  – число полос движения;  $W_p$  – ширина полосы, м;  $v$  – средняя скорость автотранспорта, км/ч;  $P_b$  – степень загруженности трафика, баллы;  $T$  – рассматриваемый период, мин;  $G$  – соответственно, интенсивности движения за период  $T$  ( $1 \dots V$  – типы транспортных средств);  $S$  – соответственно, число остановок транспортных средств на конце перегона за период  $T$ ;  $P_c$  – продолжительность цикла остановки транспортных средств,

мин;  $N_c$  – количество циклов остановки транспортных средств за период  $T$ .

Помимо перегонов модель включает объекты локальной неоднородности транспортного потока. К объектам локальной неоднородности относятся дорожные объекты, за исключением тех, которые являются границами перегонов (пешеходные переходы, железнодорожные переезды). Кorteж параметров объектов локальной неоднородности определяется выражением

$$S_i = \{P_c, N_c, T, S_1 \dots S_V\}.$$

Структура данных содержит перечень параметров, необходимых для дальнейшего моделирования загрязнений. В соответствии с разработанными критериями деления дорожной сети, corteж параметров перегонов и объектов локальной неоднородности транспортного потока реализован алгоритм разделения дорожной сети на перегоны и построена пространственная модель дорожной сети [5].

**Расчет массовых величин эмиссии загрязняющих веществ.** Расчет массовых величин эмиссии загрязняющих веществ осуществляется в соответствии с ранее разработанным алгоритмом [4] и пространственной моделью дорожной сети. Процедура расчета эмиссии загрязняющих веществ регулируется ГОСТ Р 56162–2019 [6].

Эмиссия  $i$ -го загрязняющего вещества  $M_i$  [г/с], производимого движущимся по перегону протяженностью  $L$  [км] потоком транспортных средств, определяется следующим образом:

$$M_i = \frac{L}{T \cdot 60} \sum_1^k M_{k,i}^L G_k r_{v_{kj}},$$

где  $M_{k,i}^L$  – удельная эмиссия  $i$ -го загрязняющего вещества транспортными средствами  $k$ -го типа, г/км;  $G_k$  – интенсивность движения автомобилей  $k$ -го типа за период  $T$ ;  $r_{v_{kj}}$  – поправочный коэффициент средней скорости движения автомобилей.  $M_{k,i}^L$  для рассматриваемого региона определяется в соответствии с [7]. При определении данных величин важное значение имеет парк транспортных средств, в частности соотношение категорий автомобилей, соответ-

ствующих тому или иному классу экологической безопасности (Евро0...Евроб), типу применяемого топлива, году выпуска и степени износа. Удельные эмиссии твердых частиц определяются в соответствии с [8]. Удельные эмиссии загрязнителей, в первую очередь твердых частиц невыхлопного происхождения, также зависят от климатических условий, состояния дорожного полотна. В частности, применение шипованных покрышек в зимний период значительно увеличивает степень его истирания, приводя к большей эмиссии твердых частиц. В качестве источника данных об интенсивности движения используются результаты видеосъемки с камер наблюдения, обработанные с использованием нейросети ImageAI [9]. Скоростной режим оказывает значительное влияние на эмиссию выхлопных газов: частые периоды торможения и разгона, которые характерны для движения плотного транспортного потока в условиях городской среды, способствуют увеличению удельной эмиссии.

Объекты локальной неоднородности потока вызывают периодические остановки автотранспорта, так же как и регулируемые перекрестки на концах перегонов. Скопление очереди транспортных средств в районе таких объектов учитывается при моделировании за счет введения дополнительной удельной эмиссии для неподвижного транспорта  $S_1 \dots V$ .

В результате расчета для каждого перегона и объекта локальной неоднородности потока формируется перечень эмиссии загрязняющих веществ. Совокупность полученных массовых эмиссий загрязняющих веществ, произведенных каждым источником загрязнения (объектом пространственной модели дорожной сети), климатические условия и характеристики окружающей среды формируют перечень данных, необходимых для моделирования рассеяния загрязняющих веществ и определения разовых концентраций загрязнителей в рассматриваемых точках пространства.

**Моделирование распространения концентрации загрязняющих веществ.** Моделируемым параметром является максимальная разовая приземная концентрация загрязняющего вещества. При всем многообразии существующих моделей рассеяния, в их основе, как правило, лежит один из подходов к решению

уравнения турбулентной диффузии. При выборе модели рассеяния для реализации алгоритма наиболее важными критериями являются достоверность результатов, соответствие нормативным требованиям и потенциальная скорость обработки данных. Данным критериям удовлетворяют квазиэмпирические модели. В качестве базовой модели рассеяния используются методы, описанные в [10]. В соответствии с вышеуказанными методами реализован алгоритм моделирования приземной концентрации загрязняющих веществ, производимых точечными источниками [11]. Однако, учитывая значительную протяженность, автомобильные дороги необходимо классифицировать как протяженные или площадные объекты и целесообразно рассматривать линейную модель при моделировании загрязнения, поскольку в исследуемом масштабе длина дороги значительно превосходит ширину. Предлагаемый метод моделирования был изложен в [12].

Автомобильная дорога рассматривается как источник выбросов фиксированной высоты. В качестве протяженного источника рассматривается дорожный перегон, а в качестве мощности эквивалентного точечного источника – эмиссия загрязнителя потоком автотранспорта, движущегося по данному перегону. Максимальная приземная концентрация [10] определяется выражением

$$C_{\max} = \frac{0.9AMF\eta}{H^{7/3}},$$

где  $A$  – коэффициент, характеризующий температурную стратификацию атмосферы (для Санкт-Петербурга  $A = 160$ );  $M$  – эмиссия загрязняющего вещества потоком транспортных средств за период  $T$ , г/с;  $F$  – коэффициент, характеризующий скорость гравитационного оседания загрязнителя;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности (для ровной местности  $\eta = 1$ ). При этом опасная скорость ветра для рассматриваемого типа источников составляет  $u_{\max} = 0.5$  м/с. Расстояние, на котором достигается максимальная приземная концентрация загрязняющего вещества  $C_{\max}$  при неблагоприятных метеорологических условиях, составляет  $x_{\max} = 5.7 \cdot H$ .

Разовая концентрация загрязнителя  $c$  в рассматриваемой точке местности  $(x, y, z)$  определяется в соответствии с величинами  $C_{\max}$ ,  $u_{\max}$ ,  $x_{\max}$  и заданными скоростью  $u$  и направлением ветра  $u_f$ .

Дорожный перегон рассматривается как протяженный источник. В соответствии с моделью [10] концентрация загрязнителя от линейного источника  $(c_l)$ , расположенного вдоль отрезка  $l$  трехмерной кривой, рассчитывается по формуле

$$c_l(x, y, z) = \frac{1}{|L|} \int_l c(x - \xi, y - \eta, z - \zeta) dl,$$

где  $c_l(x, y, z)$  – концентрация загрязняющего вещества, достигаемая в точке  $(x, y, z)$  в результате воздействия точечного источника, находящегося в точке  $(\xi, \eta, \zeta)$  отрезка  $l$  длины  $|L|$ . Подынтегральная функция вычисляется по формулам, применяемым для эквивалентного точечного источника. Характеристики эмиссии загрязняющего вещества и направление ветра принимаются постоянными на протяжении всего перегона.

В рамках поставленной задачи рассматривается приземная концентрация загрязняющих веществ  $c(x, y)$ . Расчет ведется для наземных источников выброса (дорожные перегоны, расположенные на уровне земли). Поэтому из выражения исключается вертикальная составляющая  $z$ :

$$c_l(x, y) = \frac{1}{|L|} \int_l c(x - \xi, y - \eta) dl,$$

Пусть координаты концов дорожного перегона заданы в виде  $A(x_1, y_1)$  и  $B(x_2, y_2)$ , а сам он задан функцией  $y(x)$ . Криволинейный интеграл первого рода в данном случае может быть сведен к определенному интегралу:

$$c_l(x, y) = \frac{1}{|L|} \int_{x_1}^{x_2} c(x - \xi, y - \eta) \sqrt{1 + [y'(x)]^2} |dx|.$$

В простейшем случае, если источник загрязнения задан прямой и определена локальная система координат с началом в точке  $x_1, y_1$  и осью  $Ox$ , совпадающей с направлением ис-

точника, определенный интеграл сводится к сумме концентраций загрязняющих веществ, производимых точечными источниками, расположенными на каждом малом отрезке протяженного источника, шаг расположения которых задан в соответствии с требованиями к точности моделирования.

Моделирование проводится для всех исследуемых дорожных перегонов. Учитывая специфику задания геометрии протяженных объектов в геоинформационных системах (ГИС), их можно в автоматизированном режиме разбить на элементарные прямолинейные участки, для каждого из которых задать локальную систему координат. При этом дискретность вычисления интегралов может быть подобрана в соответствии с требованиями к точности моделирования приземной концентрации.

**Расчет суммарной концентрации загрязняющих веществ.** В соответствии с [10], концентрация загрязняющего вещества в рассматриваемой точке определяется как сумма концентраций данного вещества от всех источников эмиссии, воздействующих на данную точку при заданных направлении и скорости ветра:

$$C = c_1 + c_2 + \dots + c_N,$$

где  $c_1, c_2, \dots, c_N$  – концентрации загрязняющего вещества, соответственно, от 1, 2, ...,  $N$ -го источников эмиссии, расположенных с наветренной стороны.

Важной задачей при оценке суммарной концентрации загрязняющих веществ является определение граничных условий для моделирования концентрации от каждого рассматриваемого источника: если рассматривается воздействие одного отдельно взятого источника (перегона или объекта локальной неоднородности потока), расчет концентрации осуществляется последовательно с заданным шагом в точках, по мере удаления от источника до тех пор, пока концентрация превосходит предельно допустимую ( $c_i$  ПДК). Когда рассматривается суммарное воздействие от группы компактно расположенных источников, что характерно для задачи оценки автотранспортного загрязнения, очевидно, что в некоторых точках суммарная концентрация от нескольких источ-

ников может превышать ПДК и при условии, что ни одна из составляющих ее не превысила. По этой причине граничные условия для моделирования концентрации  $i$ -го загрязняющего вещества следует определять из соотношения

$$c_{i \text{ гр}} = c_i \text{ ПДК} / n - c_{i \text{ фон}},$$

где  $n$  – количество источников  $i$ -го загрязняющего вещества, располагающихся в пределах максимального характерного расстояния достижения по направлению ветра концентрации на уровне ПДК  $x_c$  ПДК, в данных метеорологических условиях определяемого эмпирическим путем;  $c_{i \text{ фон}}$  – фоновая концентрация рассматриваемого загрязняющего вещества в регионе.

**Алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ.** В соответствии с вышеизложенными методами был разработан алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ в результате воздействия автотранспорта (рис. 1).

Алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ, эмитируемых транспортным потоком, движущимся по перегону, включает следующие этапы:

1. Ввод параметров моделирования, включающих климатические параметры (направление ( $u_f$ ) и скорость ( $u$ ) ветра), перечень значений ПДК всех рассматриваемых загрязняющих веществ ( $c_i$  ПДК), определение граничных условий для моделирования рассеяния.

2. Ввод параметров дорожных перегонов, включая эмиссию каждого загрязняющего вещества  $\{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ , а также геометрии перегонов (последовательность координат сегментов дорожного перегона)  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ .

3. Разбиение дорожного перегона на сегменты, заданные координатами концов  $(x_1, y_1, x_2, y_2)$ .

4. Задание локальной системы координат с центром в точке  $x_1, y_1$  или  $x_2, y_2$  в соответствии с направлением ветра и осью  $Ox$ , совпадающей с сегментом. Логика инициализации локальной системы координат для каждого сегмента проиллюстрирована на рис. 2.

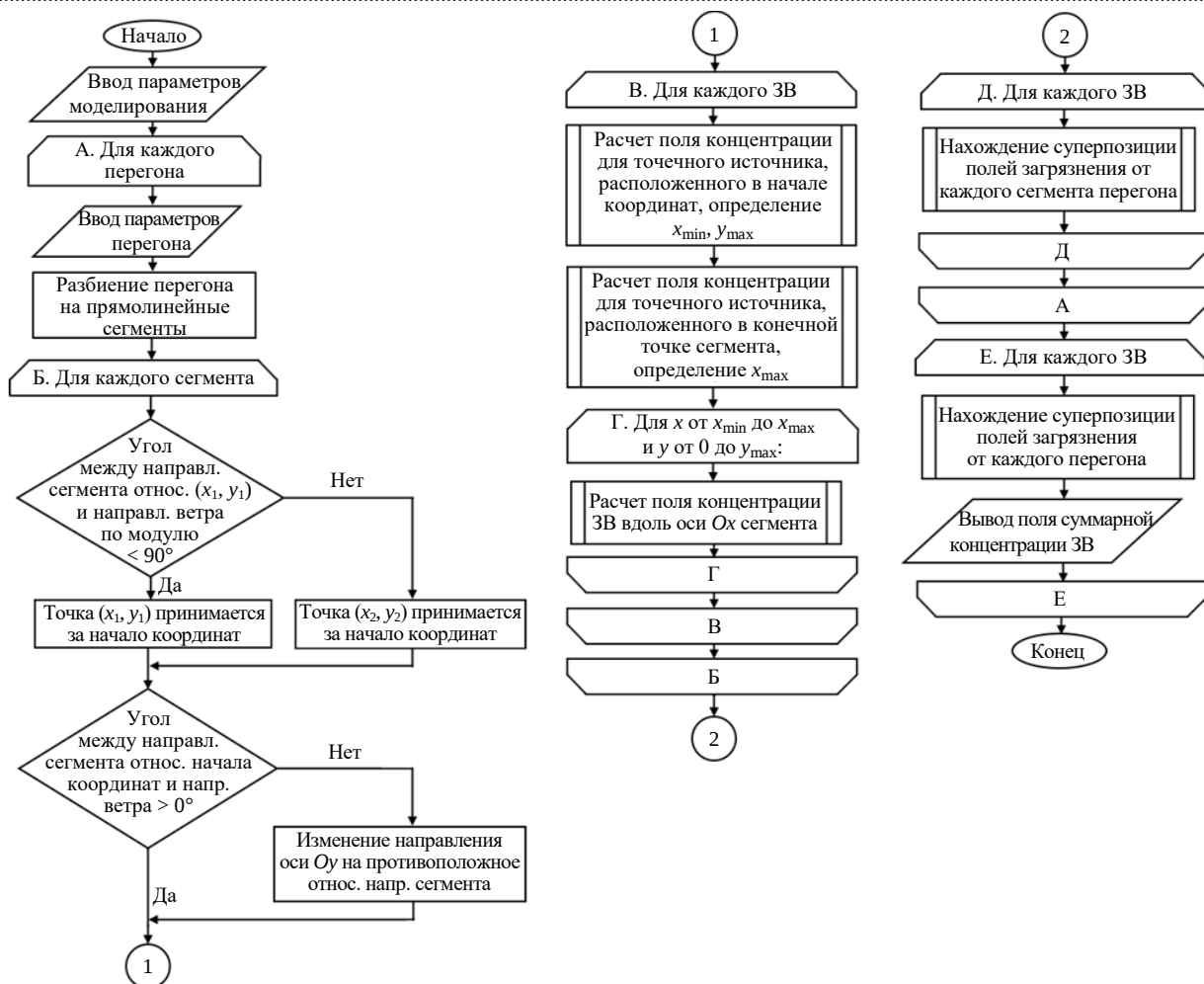


Рис. 1. Алгоритм моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ

Fig. 1. Algorithm for modeling the distribution of pollutant concentrations

5. Моделирование поля концентрации для эквивалентного точечного источника, расположенного в начале координат; определение граничных условий моделирования  $x_{\min}$ ,  $y_{\max}$  в соответствии с ПДК.

6. Моделирование поля концентрации для эквивалентного точечного источника, расположенного в конце сегмента; определение  $x_{\max}$ , на котором достигается величина, превышающая ПДК.

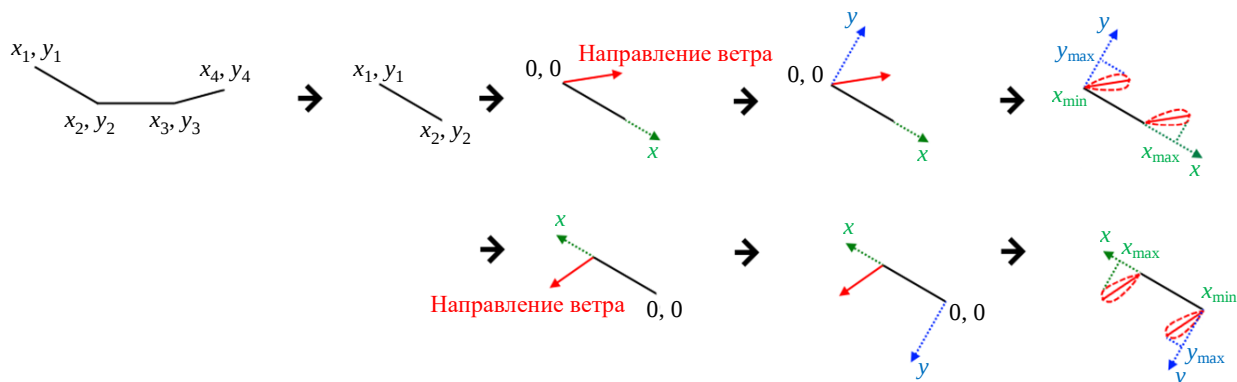


Рис. 2. Задание локальной системы координат и определение пределов интегрирования для прямолинейного сегмента дорожного перегона

Fig. 2. Setting the local coordinate system and determining the integration limits for a straight road section

7. Вычисление поля концентрации от протяженного источника путем численного интегрирования с заданным шагом для  $x$  от  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$  и  $y$  от 0 до  $y_{\max}$ .

8. Нахождение суперпозиции полей загрязнения элементарных сегментов перегона для расчета результирующего поля концентрации каждого загрязняющего вещества.

9. Нахождение суперпозиции полей концентрации загрязнителей от каждого дорожно-го перегона для расчета суммарного поля концентрации от всей дорожной сети.

Результатом работы алгоритма является массив значений приземной разовой концентрации каждого загрязняющего вещества в окрестности анализируемых дорожных перегонов с заданным шагом дискретизации  $c_1[x][y] \dots c_N[x][y]$ .

**Геоинформационная система оценки загрязнения воздуха автотранспортом.** В результате выполнения вышеизложенного алгоритма формируются данные моделирования приземной концентрации для каждого исследуемого загрязняющего вещества в результате воздействия автомобильного транспорта.

Характеристики городской среды, такие как расположение и конфигурация застройки, зеленых насаждений, структура расположения объектов гражданской инфраструктуры, требуют дополнительного учета на этапе моделирования и оценки суммарных концентраций загрязнителей и определения объектов, на которые оказывается наибольшее воздействие.

С целью обеспечения достоверности результатов моделирования за счет учета максимального числа влияющих факторов формируется геоинформационная система, позволяющая объединить данные, характеризующие: климатические условия; характеристики городской среды; пространственно-распределенные данные, интегрированные пространственной моделью дорожной сети, а также разработанные программные модули, применяемые: для вычисления массовых выбросов загрязняющих веществ; моделирования распространения приземной концентрации от точечных и протяженных источников; расчета суммарной концентрации и определения степени воздействия на урбанизированные территории. Обобщенная структура

ГИС оценки автотранспортного загрязнения представлена на рис. 3.

Пространственная модель дорожной сети реализована в геоинформационной системе QGIS. Объектом исследования выбран фрагмент территории Калининского района Санкт-Петербурга. В районе преобладают жилые зоны, степень воздействия автотранспортного загрязнения на которые превышает все другие источники загрязнения, также имеется значительное количество регулируемых перекрестков, что является типичным для городской застройки. Основные принципы построения пространственных моделей изложены в исследовании [13].

Исходные геоданные представлены в виде слоя дорог OpenStreetMap (линейные объекты), характеристик трафика, определенных для каждого участка дороги. В результате применения к данным алгоритма разбиения дорожной сети на перегоны была создана пространственная модель дорожной сети, организованная в виде реляционной базы данных, содержащей полный перечень исходных данных для моделирования автотранспортного загрязнения [14]. Результат обработки исходных данных представлен на рис. 4.

Пример моделирования распространения концентрации загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта, представлен на рис. 5.

В результате работы была создана цифровая модель автотранспортного загрязнения жилых территорий Санкт-Петербурга. Реализация модели в ГИС открывает большие возможности для оценки воздействия автотранспортного загрязнения на объекты жилой инфраструктуры, при этом в зависимости от перечня исходных данных позволяет провести моделирование в различных погодных условиях и с различным сочетанием характеристик трафика для выявления наиболее опасных сочетаний факторов загрязнения.

**Оценка достоверности полученных результатов.** Достоверность результатов оценки концентрации загрязняющего вещества определяется, главным образом, полнотой и точностью исходных данных. Суммарная стандартная неопределенность оценки разовой концентрации газообразного загрязняющего вещества в заданной пространственной точке  $c(x, y)$  определяется выражением

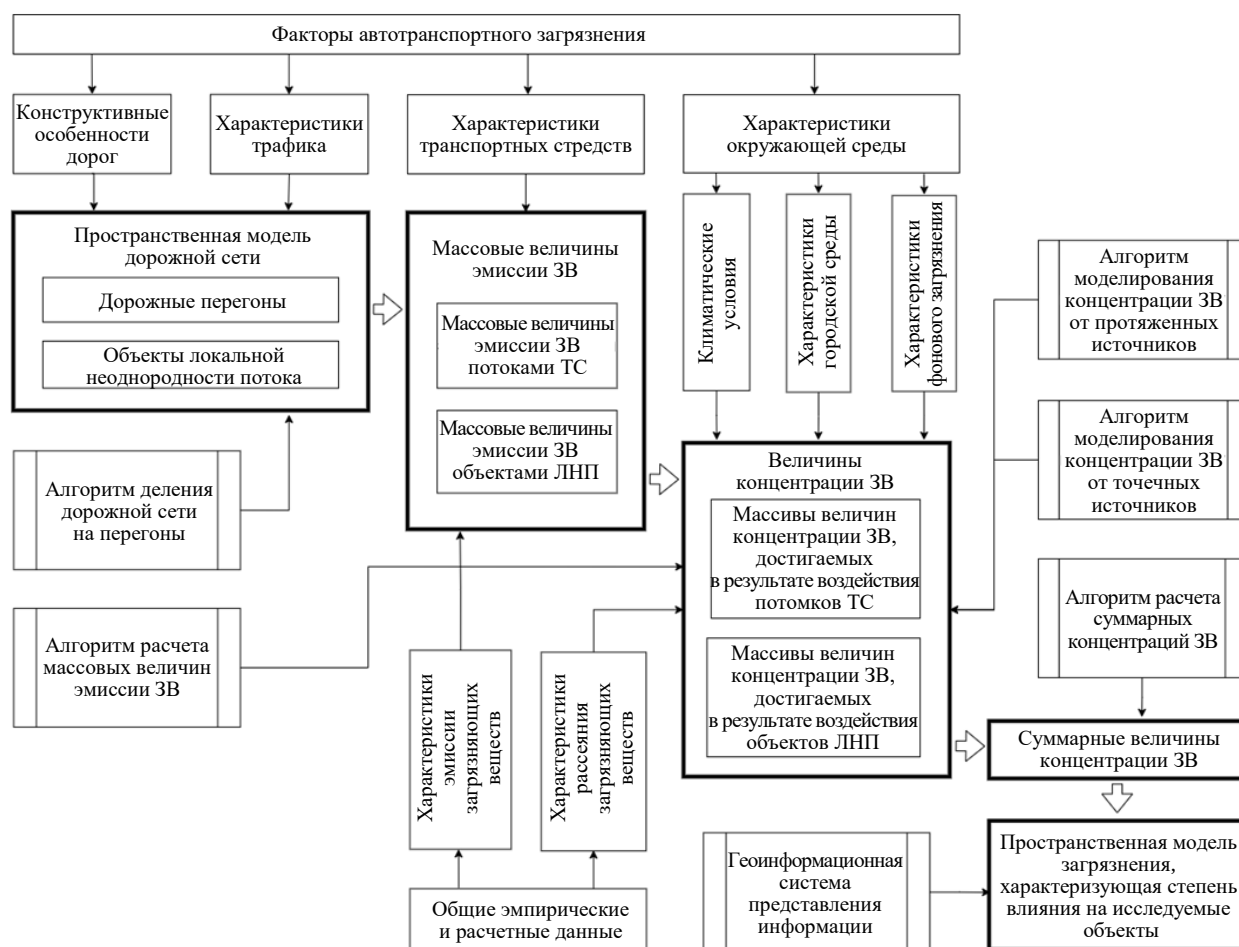


Рис. 3. Обобщённая структура геоинформационной системы оценки автотранспортного загрязнения

Fig. 3. Generalized structure of the geoinformation system for assessing air pollution under the impact of road transport

$$u(c_{x,y_i}) = \left( c_1^2 u(M_i)^2 + c_2^2 u(H)^2 + c_3^2 u(u)^2 + c_4^2 u(u_f)^2 + c_5^2 u(x)^2 + c_6^2 u(y)^2 + c_7^2 u(f)^2 \right)^{1/2},$$

где  $c_1 - c_7$  – коэффициенты влияния, определяемые в соответствии с применяемыми методиками расчета соответствующих величин;  $u(M_i)$ ,  $u(H)$ ,  $u(u)$ ,  $u(u_f)$ ,  $u(x)$ ,  $u(y)$ ,  $u(f)$  – неопределенности вычисления эмиссии  $i$ -го загрязняющего вещества, измерения высоты источника, скорости и направления ветра, координат источника, численного интегрирования. Неопределенность  $u(M_i)$  определяется выражением

$$u(M_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^k c_{8k}^2 u(G_k)^2 + c_9^2 u(L)^2 + c_{10}^2 u(T)^2},$$

где  $c_8 - c_{10}$  – коэффициенты влияния;  $u(G_k)$  – неопределенность измерения интенсивности движения  $k$ -го типа транспортных средств;

$u(L)$  – неопределенность измерения протяженности перегона;  $u(T)$  – неопределенность измерения временного интервала;  $u(G_k)$  определяется неопределенностью измерения общей интенсивности движения  $u(G)$  и неопределенностью идентификации типа транспортного средства  $u(I_k)$ :

$$u(G_k) = \sqrt{c_{11}^2 u(G)^2 + c_{12}^2 u(I_k)^2},$$

где  $c_{11}, c_{12}$  – коэффициенты влияния. При условии соответствия точности измерений входных величин требованиям перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений [15], суммарная стандартная неопределенность оценки разовой концентрации газообразного загрязняющего вещества в заданной пространственной точке будет находиться в допустимом диапазоне, позволяющем применять разработан-

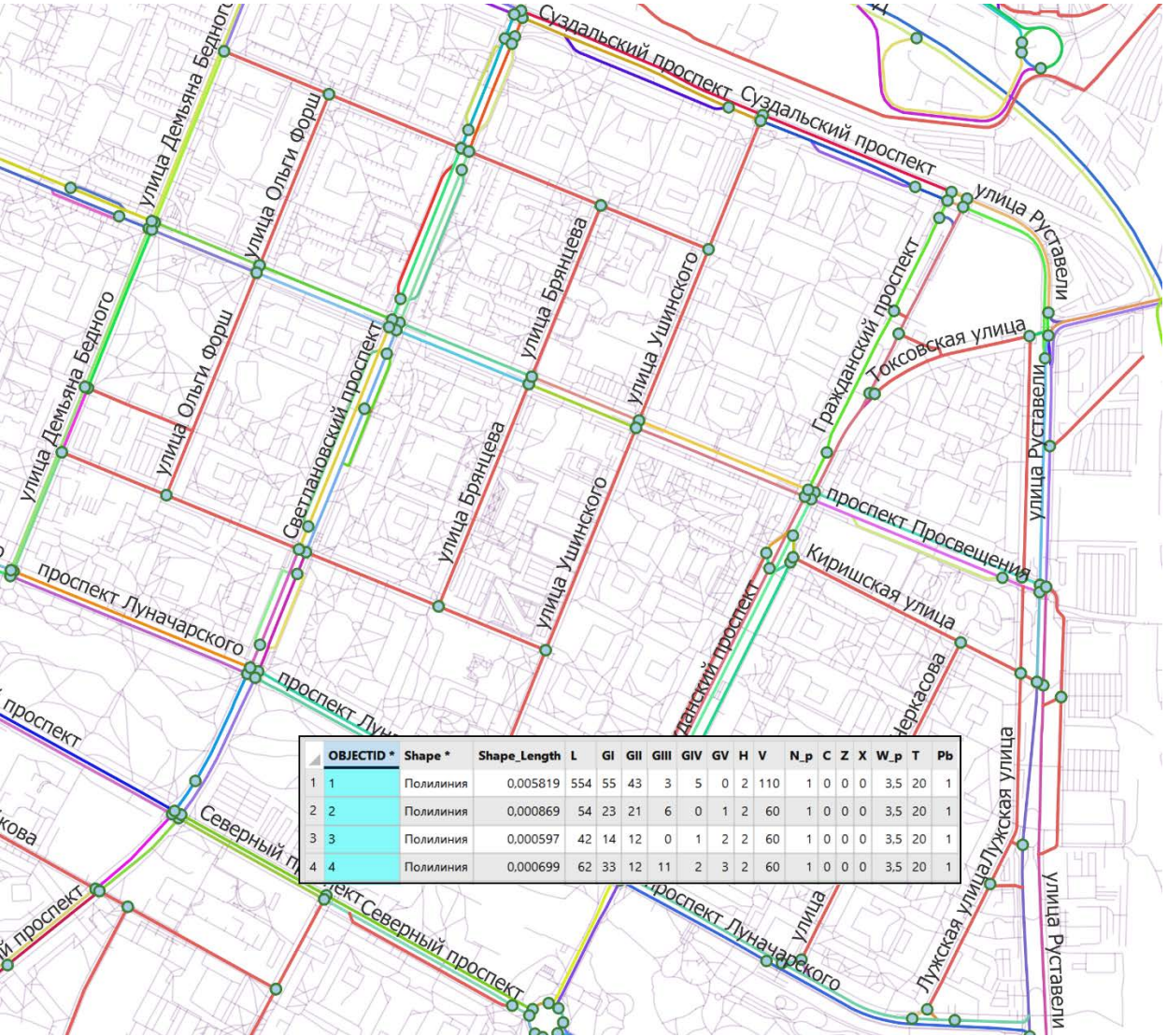


Рис. 4. Пространственная модель дорожной сети и атрибутивные данные дорожных перегонов  
Fig. 4. Spatial model of a road network and attribute data of road sections

ное программно-алгоритмическое обеспечение для экстремальной оценки загрязнения воздуха автомобильным транспортом. При этом выбранный шаг дискретизации моделирования должен обеспечивать требования [10]. Граничные условия вычисления моделирования и шаг дискретизации должны выбираться таким образом, чтобы погрешность интегрирования не превышала 3 %. Расчетная погрешность численного интегрирования в заданных начальных условиях оценивается в автоматизированном режиме путем измельчения шага дискретизации до соблюдения условий, указанных в [10]. Рекомендуемый шаг дискретизации для оценки городского загрязнения воздуха составляет 1 м. Большие значения шага дискретизации могут

быть использованы для приближенной оценки загрязнения воздуха в случае, если приоритетной является скорость обработки данных.

Неопределенность оценки разовой концентрации твердых частиц  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  помимо вышеуказанных факторов будет определяться соответствием исследуемого региона требованиям, предъявляемым методикой [8]. Факторы эмиссии невыхлопных твердых частиц в результате износа тормозной системы, протекторов шин, дорожного полотна и вторичного ресуспендирования пыли в процессе движения определены для оценки загрязнения в условиях крупного города Европейской части России с учетом совокупности влияющих климатических факторов, состояния дорожной инфраструктуры, структуры

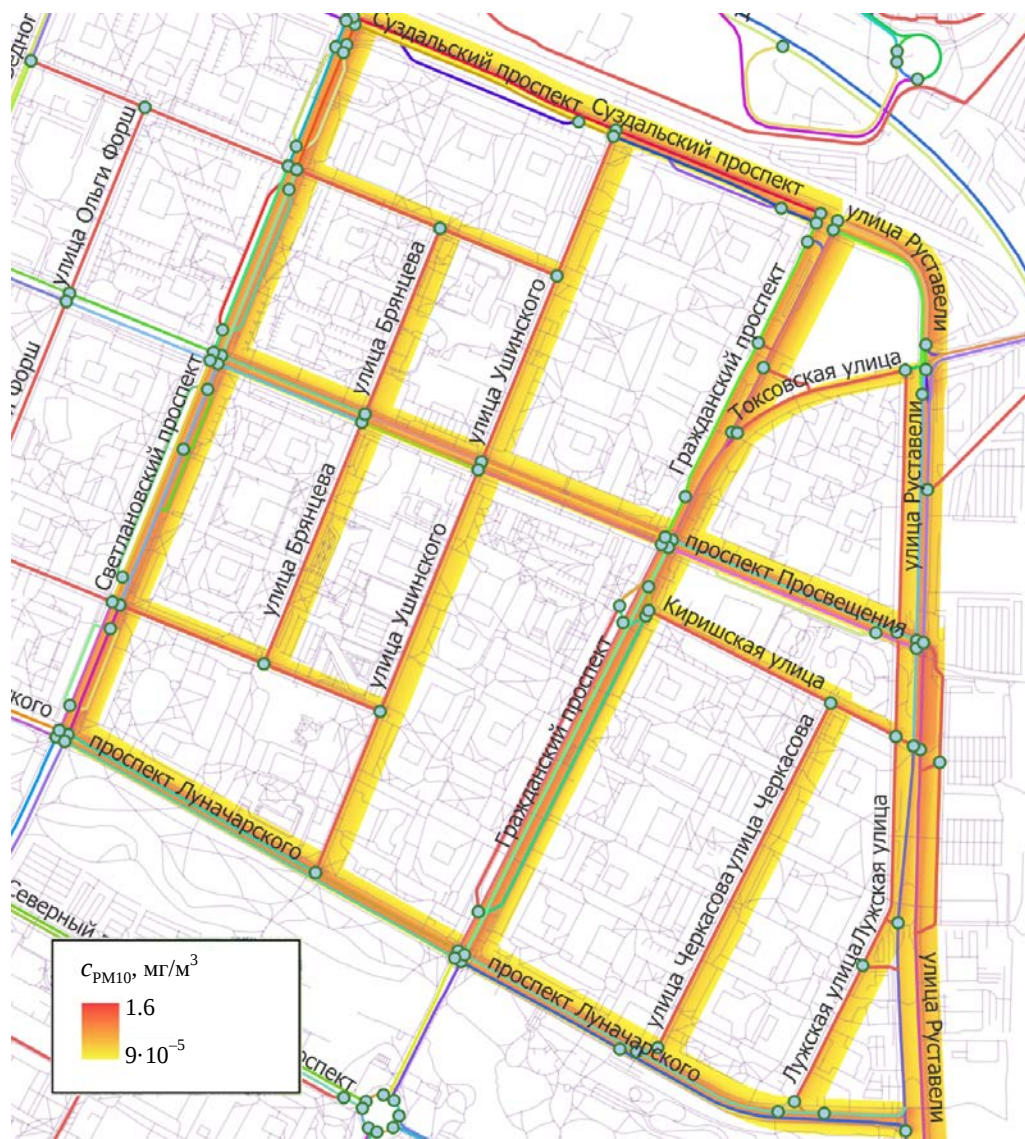


Рис. 5. Результат моделирования приземной концентрации PM10

Fig. 5. Result of modeling a ground-level PM10 concentration

автопарка по части экологического класса автомобилей и средней степени износа. Для применения разработанного программно-алгоритмического обеспечения для оценки автотранспортного загрязнения в других регионах может потребоваться верификация и корректировка факторов эмиссии загрязняющих веществ.

**Заключение.** В ходе исследования рассматривалась система оценки экологического воздействия дорожно-транспортного комплекса на качество воздуха жилых территорий городов. Были разработаны теоретические основы моделирования загрязнения атмосферного воздуха в условиях городской среды для оценки эмиссии загрязняющих веществ, производимых автотранспортными

потоками с учетом твердых частиц невыхлопного происхождения (образующихся в результате эксплуатационного износа тормозных дисков, протекторов шин и дорожного покрытия).

В соответствии с разработанными теоретическими основами создано программно-алгоритмическое обеспечение системы оценки загрязнения воздуха городской среды автомобильным транспортом, включающее модули подготовки исходных географических данных, построения пространственной модели дорожной сети, расчета эмиссии загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта и моделирования распространения концентрации с последующей возможностью анализа степени воздей-

ствия на объекты гражданской инфраструктуры. Проведена оценка достоверности полученных результатов моделирования. Разработана цифровая модель автотранспортного загрязнения жилых территорий Санкт-Петербурга. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение

планируется интегрировать в обобщенную геоинформационную модель, которая может применяться в качестве эффективного инструмента при решении задач городского планирования, оценки автотранспортного загрязнения воздуха и повышения комфортности городской среды.

### Список литературы

1. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2022 году / под ред. А. В. Германа, И. А. Серебрицкого. URL: [https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2023/06/30/40/Доклад\\_за\\_2022\\_г.pdf](https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2023/06/30/40/Доклад_за_2022_г.pdf) (дата обращения: 19.11.2024).

2. Holmes N. S., Morawska L. A Review of Dispersion Modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available // Atmospheric Environment. 2006. Vol. 40, № 30. P. 5902–5928. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.003

3. Леванчук А. В. Совершенствование системы социально-гигиенического мониторинга на территории с развитым автомобильно-дорожным комплексом // Общественное здоровье и здравоохранение. 2014. № 4. С. 78–82.

4. Куракина Н. И., Мышко Р. А. Модуль расчета массовых выбросов загрязняющих веществ, производимых потоками автотранспорта // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 105–115 doi:10.32603/1993-8985-2022-25-6-90-100

5. Мышко Р. А., Куракина Н. И., Бурдин Р. А. Алгоритм формирования пространственной модели дорожно-транспортной сети для оценки загрязнения атмосферного воздуха // Материалы XXVII Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024), Санкт-Петербург, 22–24 мая 2024. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2024. 264 с.

6. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. М.: Интеграл, 1999. 15 с.

7. Распоряжение Росприроднадзора от 13.12.2019 № 37-р "Об утверждении порядка организации работ по оценке выбросов от отдельных видов передвижных источников". URL: <https://docs.cntd.ru/document/499073959> (дата обращения: 19.11.2024).

8. Невмержицкий Н. В., Ложкина О. В., Ложкин В. Н. Расчетная методика и компьютерная программа для оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взве-

шенными частицами  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  // Вестн. гражданских инженеров. 2016. Т. 2, № 55. С. 206–209.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662545 "Оценка дорожного трафика с использованием нейросетей". URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2024662545](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2024662545) (дата обращения: 19.11.2024)

10. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения: 19.11.2024).

11. Куракина Н. И., Мышко Р. А. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами в технологии геоинформационных систем // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2021. № 5. С. 21–27.

12. Myshko R. A., Kurakina N. I. GIS for assessment and modeling air pollution by industrial facilities // IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, St Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 1789–1802. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396270

13. Анализ данных с использованием ГИС / Н. И. Куракина, Р. А. Мышко, П. Т. Прохожаев, К. Д. Дмитриенко // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2024. Т. 17, № 3. С. 36–43. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-36-43

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024623146 "База данных цифровой модели дорожной сети". URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=DB&DocNumber=2024623146](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2024623146) (дата обращения: 19.11.2024).

15. Перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений / утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 нояб. 2020 г. № 1847. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302171502/titles/65401> (дата обращения: 19.11.2024).

### Информация об авторах

**Куракина Наталия Игоревна** – кандидат технических наук (2001), доцент (2002), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий, директор УНЦ "ГИС технологии" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 180 научных работ. Сфера научных интересов – комплексная оценка; мониторинг; анализ и управление объектами на ГИС-основе.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: NIKurakina@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1827-5259>

**Мышко Роман Андреевич** – магистр по специальности "Приборостроение" (2021, СПбГЭТУ "ЛЭТИ"), аспирант кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – алгоритмическое и программное обеспечение ГИС-систем.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: romanmyshko@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5657-1126>

**Бурдин Родион Александрович** – бакалавр по специальности "Приборостроение" (2024, СПбГЭТУ "ЛЭТИ"), магистрант кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – алгоритмическое и программное обеспечение ГИС-систем.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: rodiogch@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-7698-7400>

**Денисова Наталья Федоровна** – кандидат физико-математических наук (2006), ассоциированный профессор-доцент (2020), ассоциированный профессор департамента информационных технологий, цифровой офицер Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева. Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – математическое и компьютерное моделирование; анализ и управление объектами на ГИС-основе.

Адрес: Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, д. 19, Усть-Каменогорск, 070004, Казахстан

E-mail: ndenisova@edu.ektu.kz

<https://orcid.org/0000-0003-0525-730X>

## References

1. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Sankt-Peterburge v 2022 godu* [Report on the Environmental Situation in St Petersburg in 2022]. Ed. by A. V. German, I. A. Serebriiskii. Available at: [https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2023/06/30/40/Доклад\\_за\\_2022\\_г.pdf](https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2023/06/30/40/Доклад_за_2022_г.pdf) (accessed 19.11.2024).

2. Holmes N. S., Morawska L. A Review of Dispersion Modelling and Its Application to the Dispersion of Particles: An Overview of Different Dispersion Models Available. *Atmospheric Environment*. 2006, vol. 40, no. 30, pp. 5902–5928. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.003

3. Levanchuk A. V. System Development of Social-Hygienic Monitoring in the Territory with Developed Automobile-Road Complex. *Public Health and Health Care*. 2014, no. 4, pp. 78–82. (In Russ.)

4. Kurakina N. I., Myshko R. A. A Module for Calculating Pollutant Mass Emissions Produced by Traffic Flows. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 6, pp. 90–100. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-90-100 (In Russ.)

5. Myshko R. A., Kurakina N. I., Burdin R. A. *Algoritmy formirovaniya prostranstvennoy modeli dorozhno-transportnoy seti dlya ochenki zagryazneniya atmosfernogo vozduha* [Algorithm for Generation of a Road Transport Network Spatial Model for Assessing Air Pollu-

tion]. *Proc. of the XXVII Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM'2024)*, SPb., 22–24 May 2024. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2024, 264 p. (In Russ.)

6. *Metodika opredeleniya vybrosov avtotransporta dlja provedeniya svodnyh raschetov zagryazneniya at-mosfery gorodov*. [Methodology for Determining Vehicle Emissions for Conducting Summary Calculations of Urban Air Pollution.]. Moscow, Integral, 1999, 15 p. (In Russ.)

7. *Rasporjazhenie Rosprirodnadzora ot 13.12.2019 № 37-r "Ob utverzhdenii porjadka organizacii rabot po ocenke vybrosov ot otdel'nyh vidov peredvizhnyh istochnikov"* [Order of Rosprirodnadzor dated 13.12.2019 № 37-r "On Approval of the Procedure for Organizing Work on Assessing Emissions from Certain Types of Mobile Sources"]. Available: <https://docs.cntd.ru/document/499073959> (accessed 19.11.2024).

8. Nevmerzhitsky N. V., Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Calculation Methodic and Computer Program for Estimation and Prognostication of Road Air Pollution by PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2016, vol. 2, iss. 55, pp. 206–209. (In Russ.)

9. *Ocenka dorozhnogo trafika s ispol'zovaniem nejrosetej* [Road traffic estimation using neural networks]. Certificate of state registration of a computer program no. 2024662545. Available at: <https://new.fips.ru/>

registers-doc-view/fips\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2024662545 (accessed 19.11.2024)

10. *Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh* [Methods for Calculating the Dispersion of Emissions of Harmful (Polluting) Substances in the Atmospheric Air]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (accessed 23.11.2022)

11. Kurakina N. I., Myshko R. A. Atmospheric Air Pollution Modeling by Industrial Facilities in the Technology of Geoinformation Systems. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2021, no. 5, pp. 21–27. (In Russ.)

12. Myshko R. A., Kurakina N. I. GIS for assessment and modeling air pollution by industrial facilities // IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, St Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 Jan. 2021. IEEE, 2021, pp. 1789–1802. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396270

13. Kurakina N. I., Myshko R. A., Prokhozhaev P. T., Dmitrienko K. D. Analysis of Aerial Photography Data Using GIS. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2024, vol. 17, no. 3, pp. 36–43. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-36-43 (In Russ.)

14. *Baza dannyh cifrovoj modeli dorozhnoy seti* [Digital Road Network Model Database] Certificate of state registration of a computer program no. 2024623146. Available at: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=DB&DocNumber=2024623146](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2024623146) (accessed 19.11.2024)

15. *Perechen' izmerenij, odnosjashhihsja k sfere gosudarstvennogo regulirovaniya obespechenija edinstva izmerenij*. [List of measurements related to the sphere of state regulation of ensuring the unity of measurements] Approved by Decree of the Government of the Russian Federation of November 16, 2020 no. 1847. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1302171502/titles/65401> (accessed 19.11.2024)

### Information about the authors

**Natalia I. Kurakina**, Cand. Sci. (Eng.) (2001), Associate Professor (2002), Associate Professor of the Department of Information and Measurement Systems and Technology, Director of the Scientific and Research Center "GIS Technologies" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 180 scientific publications. Area of expertise: complex assessment; monitoring; analysis and object management on the GIS basis. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St, St Petersburg 197022, Russia E-mail: NIKurakina@etu.ru <https://orcid.org/0000-0003-1827-5259>

**Roman A. Myshko**, Master's degree in "Instrument Engineering" (2021, ETU), Postgraduate of the Department of Information and Measurement Systems and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: algorithmic and software support of GIS-systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St, St Petersburg 197022, Russia E-mail: romanmyshko@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5657-1126>

**Rodion A. Burdin**, Bachelor's degree in "Instrument Engineering" (2024, ETU), Master of the Department of Information and Measurement Systems and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: algorithmic and software support of GIS-systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St, St Petersburg 197022, Russia E-mail: rodiogch@gmail.com <https://orcid.org/0009-0004-7698-7400>

**Natalya F. Denisova**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2006), Associate Professor (2020), Associate Professor of Department of Information Technologies, digital officer of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: mathematical and computer modeling; analysis and management of objects on a GIS basis. Address: D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, D. Serikbaev St, Ust-Kamenogorsk 070004, Republic of Kazakhstan E-mail: ndenisova@edu.ektu.kz <https://orcid.org/0000-0003-0525-730X>

## Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при решении задач метрологического анализа

Е. Н. Жданова✉, Н. В. Романцова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉enzhdanova@etu.ru

### Аннотация

**Введение.** В настоящий момент ведутся работы по созданию специализированных программных систем, предназначенных для метрологического синтеза и анализа. Такие системы включают в себя набор функциональных блоков для решения типовых метрологических задач. Одной из таких задач является определение характеристики измеряемого образца посредством набора эталонов. Например, требуется определить толщину образца с помощью рентгеноспектрального анализа на основе знаний о характеристиках набора эталонов и с учетом инструментальной и методической погрешностей.

**Цель работы.** Разработка программно-алгоритмического обеспечения типовых функциональных блоков программной системы, предназначенной для метрологического анализа в части выполнения расчетов рентгеноспектрального анализа.

**Материалы и методы.** Разрабатываемый функциональный блок на языке G и в программной системе GNU Octave принимает на вход вид и характеристики закона распределения инструментальной погрешности прибора, значения мощностей экспозиционной дозы излучения для набора эталонов и образца, а также толщину эталонов. На выходе данный блок выдает результат измерения толщины образца и его закон распределения. Таким образом, результат измерения включает в себя инструментальную погрешность, погрешность метода аппроксимации, а также погрешности преобразований.

**Результаты.** Разработано программно-алгоритмическое обеспечение типовых функциональных блоков программной системы, предназначенной для выполнения расчетов рентгеноспектрального анализа. Данное программное обеспечение позволяет ускорить метрологический анализ для задачи определения толщины образца на основе ряда измерений набора эталонов. Корректность программно-алгоритмического обеспечения типовых функциональных блоков программной системы подтверждена приведенными примерами, которые были реализованы расчетным методом, а также тестированием созданного программного обеспечения в среде графического программирования на языке G и в программной системе GNU Octave.

**Заключение.** Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение будет использовано в программных системах метрологического синтеза и анализа.

**Ключевые слова:** характеристика преобразования, погрешность результата измерения, метрологический синтез, метрологический анализ, модель функционального блока

**Для цитирования:** Жданова Е. Н., Романцова Н. В. Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при решении задач метрологического анализа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 95–105. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-95-105

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20064, <https://rscf.ru/project/24-29-20064/>, а также гранта Санкт-Петербургского научного фонда (договор № 24-29-20064 от 22.05.2024).

Статья поступила в редакцию 31.07.2024; принята к публикации после рецензирования 13.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024



## Mathematical Support and Software for Determining the Error in Solving Metrological Analysis Problems

Ekaterina N. Zhdanova<sup>✉</sup>, Natalia V. Romantsova

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>✉</sup>enzhdanova@etu.ru

### Abstract

**Introduction.** Work is currently underway to create specialized software systems designed for metrological synthesis and analysis. Such systems should include a set of functional blocks for solving typical metrological tasks. One of these tasks is to determine the characteristics of the sample under measurement by means of a set of reference standards. For example, it is required to determine the thickness of a sample using X-ray spectral analysis based on knowledge about the characteristics of a set of reference standards taking instrumental and methodological errors into account.

**Aim.** Development of software and algorithmic support for standard functional blocks of a software system designed for metrological analysis, intended for performing calculations of X-ray spectral analysis.

**Materials and methods.** The functional block, developed in the G language and in the GNU Octave software system, takes as input the type and characteristics of the distribution law of the instrumental error of the instrument, values of the exposure dose of radiation for the set of reference standards and the sample, as well as the thickness of the reference standards. At the output, this functional block outputs the result of measuring the thickness of the sample and its distribution law. Thus, the measurement result includes the instrumental error, the error of the approximation method, as well as the errors of the transformations.

**Results.** The software and algorithmic support of typical functional blocks of a software system designed to perform calculations of X-ray spectral analysis has been developed. This software facilitates metrological analysis for the task of determining the thickness of a sample based on a number of measurements of a set of reference standards. The correctness of the software and algorithmic support for typical functional blocks of the software system is confirmed by implementing the proposed calculation method, as well as by testing the developed software in both the graphical programming environment in the G language and the GNU Octave software system.

**Conclusion.** The developed software and algorithmic software can be used in software systems for metrological synthesis and analysis.

**Keywords:** conversion characteristics, measurement result error, metrological synthesis, metrological analysis, functional block model

**For citation:** Zhdanova E. N., Romantsova N. V. Mathematical Support and Software for Determining the Error in Solving Metrological Analysis Problems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 95–105. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-95-105

**Conflict of interest** The authors declare no conflicts of interest

**Source of funding.** The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-29-20064, <https://rscf.ru/project/24-29-20064/>, and a grant from the St.Peterburg Science Foundation (agreement № 24-29-20064 dated 05/22/2024).

Submitted 31.07.2024; accepted 13.11.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Для моделирования электрических схем существуют программные среды, на основе которых возможно проводить метрологический синтез средств измерения и анализировать результаты измерения [1], однако данные задачи требуют больших трудозатрат.

В [2] рассматривается математическое моделирование измерительного прибора и его погрешностей в среде моделирования MATLAB & Simulink, в [3, 4] рассматривается использование среды программирования LabVIEW и среды моделирования измерительных цепей

Electronics Workbench для проведения метрологического анализа измерительных систем. Разработка измерительных каналов в средах схемотехнического моделирования позволяет осуществлять подбор элементной базы в зависимости от требуемых точностных характеристик.

Также среди программного обеспечения для моделирования электронных схем можно выделить Multisim, Proteus, PCad, Micro-Cap, DoCircuits, СИМИКА и др. Все эти программы имеют обширную базу элементов, среди которых есть датчики, что позволяет моделировать электрические цепи, однако данные продукты не специализируются на метрологическом синтезе и анализе.

В настоящий момент ведутся работы по созданию специализированных программных систем, предназначенных для метрологического синтеза и анализа [5–7]. Такие системы должны включать в себя набор функциональных блоков для решения типовых метрологических задач. Одной из таких задач является определение характеристики измеряемого образца посредством набора эталонов. Например, требуется определить толщину образца с помощью рентгеноспектрального анализа [8–17] на основе знаний о характеристиках набора эталонов и с учетом инструментальной и методической погрешностей.

**Постановка задачи и метод ее решения.** Разработка программно-алгоритмического обес-

печения типовых функциональных блоков программной системы, предназначенной для метрологического анализа в части выполнения расчетов рентгеноспектрального анализа. Типичная задача в области рентгеноспектрального анализа формулируется следующим образом: существует набор эталонов с известной характеристикой, например толщиной эталона; необходимо определить эту характеристику у образца. Чтобы определить характеристику образца, прежде всего проводят рентгеноспектральный анализ каждого эталона. Измерение характеристик эталона выполняется с инструментальной погрешностью измерительного прибора. Далее на основании полученных результатов измерения строится зависимость искомой величины от спектральных характеристик эталонов. Данная зависимость содержит погрешность аппроксимации. Следующим шагом является проведение рентгеноспектрального анализа образца, по результатам которого и на основании полученной зависимости определяется искомая характеристика.

Рассмотрим упрощенную задачу (рис. 1), для которой исходными данными являются известные параметры эталонов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ . Для этих значений при помощи измерительного прибора определяются величины  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  с установленной инструментальной погрешно-

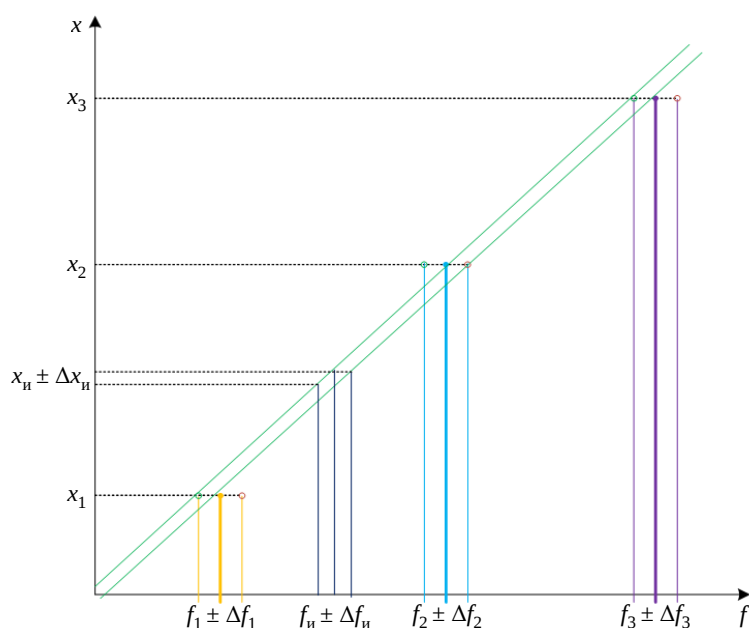


Рис. 1. Построение характеристики преобразования измеряемого параметра  $f$  в толщину  $x$

Fig. 1. Construction of the characteristic of converting the measured parameter  $f$  into thickness  $x$

стью. Зависимость между величинами  $f$  и  $x$  является линейной и определяется из малой выборки. На основании малой выборки и границ доверительных интервалов значений  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  строятся граничные варианты линейной зависимости  $x_{\text{л}}(f)$  и  $x_{\text{п}}(f)$ . Причем  $x_{\text{л}}(f)$  не должна выходить за пределы доверительных интервалов и стремится пройти через крайнее левое положение интервала, а  $x_{\text{п}}(f)$  не должна выходить за пределы доверительных интервалов и стремится пройти через крайнее правое положение интервала. Таким образом, формируется тоннель для возможных значений  $x(f)$ . При определении параметра образца  $x_{\text{и}}$  измеряется величина  $f_{\text{и}}$  измерительным прибором. Данное измерение выполняется с инструментальной погрешностью  $\Delta f_{\text{и}}$ , границы доверительного интервала  $f_{\text{и}}$  переносятся на линейные зависимости  $x_{\text{л}}(f)$  и  $x_{\text{п}}(f)$ , с которых проецируется доверительный интервал для  $x_{\text{и}}$ . Если случайная величина  $f_{\text{и}}$  распределена по нормальному закону и так как  $x(f)$  является линейной зависимостью, то  $x_{\text{и}}$  также распределена по нормальному закону.

Алгоритмическое обеспечение функционального блока.

1. Ввод среднеквадратичного отклонения (СКО) прибора для измерения мощности экспозиционной дозы излучения  $P_D$ , вычисление СКО мощности экспозиционной дозы излучения  $P_{Dj}$  после прохождения фильтра толщиной  $x_j$ , вычисление СКО мощности экспозиционной дозы излучения без фильтра  $P_{D0}$ . Вычисление

отношения  $f_j = \frac{P_{Dj}}{P_{D0}}$ , определение СКО  $f_j$ :

$$\sigma_{f_j} = \sqrt{\frac{1}{P_{D0}^2} \sigma_{P_{Dj}}^2 + \frac{P_{Dj}^2}{P_{D0}^4} \sigma_{P_{D0}}^2}.$$

2. Аппроксимация зависимости отношения экспозиционной дозы излучения  $P_{Dj}$  и мощности экспозиционной дозы излучения без фильтра  $P_{D0}$  от толщин фильтра  $x_j$  линейным законом, который характеризуется туннелем, описываемым двумя прямыми линиями (рис. 2).

3. Определение тангенса угла наклона к оси  $x$ , который равен эффективному линейному коэффициенту ослабления ( $\mu_{\text{эф}}$ ).

4. Определение доверительного интервала для  $\mu_{\text{эф}}$ .

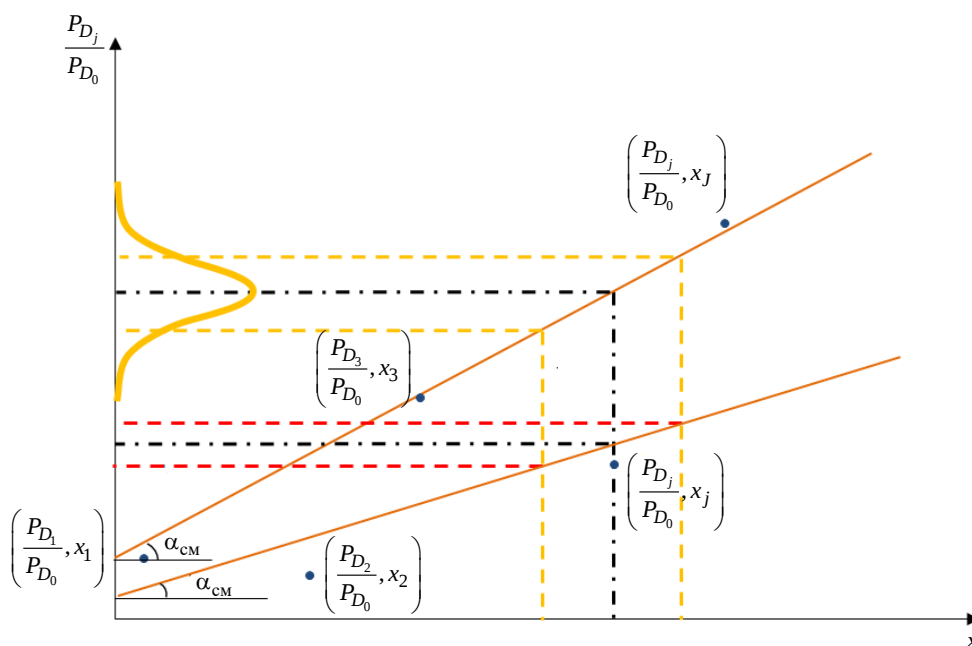


Рис. 2. Зависимость измеряемой величины от спектральных характеристик образца

Fig. 2. Dependence of the measured value on the spectral characteristics of the sample

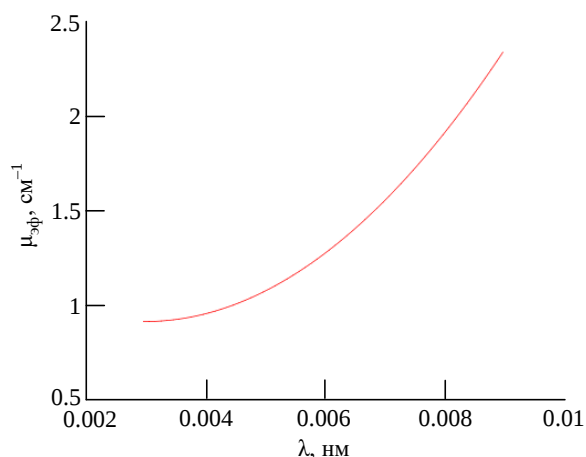


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента ослабления от длины волны

Fig. 3. Dependence of the effective attenuation coefficient on the wavelength

5. Определение минимальной длины волны  $\lambda_{\min}$  в спектре излучения импульсной рентгеновской трубки (ИРТ) и доверительного интервала  $\lambda_{\min}$ .

Для фильтров из определенного материала зависимость эффективного коэффициента ослабления от длины волны (рис. 3) можно описать полиномом второго порядка вида

$$\mu_{\text{эф}}(\lambda) = \text{tg } \alpha_{\text{см}} = 1.3012 - 241.0714\lambda + 39880.9523\lambda^2.$$

Таким образом,  $\lambda_{\min}$  будет определяться выражением

$$\lambda_{\min} = 0.0030 + \frac{\sqrt{-149458 + 159524 \text{tg } \alpha_{\text{см}}}}{79762}. \quad (1)$$

6. Определение амплитуды импульса напряжения на ИРТ по формуле

$$U = \frac{1.24}{\lambda_{\min}} \quad (2)$$

и доверительного интервала  $\pm \Delta U$ .

7. Вывод измеряемой величины и ее погрешности.

Модель функционального блока (рис. 4) принимает на вход вид инструментальной погрешности в виде плотности распределения случайной величины или как закон распределения с его характеристиками, также на вход функционального блока поступают значения  $J$  эталонов и их измеренные параметры  $\{x_j, P_{D_j}\}_1^J$ , в том числе измеренный параметр

$P_{D_{\text{и}}}$  образца и мощность экспозиционной дозы излучения без фильтра  $P_{D_0}$ . На выход модели функционального блока поступают значение искомого параметра образца  $x_{\text{и}}$ , характеристики погрешности измеренного значения в виде доверительного интервала или вида плотности распределения измеряемой величины, а также амплитуды импульса напряжения на ИРТ и характеристика ее погрешности и минимальная длина волны  $\lambda_{\min}$  в спектре излучения импульсной рентгеновской трубки и характеристика ее погрешности.

На рис. 5  $\sigma_{f_j}$  – СКО величины  $f_j$ , известное для конкретного измерительного прибора;  $x = kf + a$  – уравнение, описывающее линейную зависимость  $x$  от  $f$ .

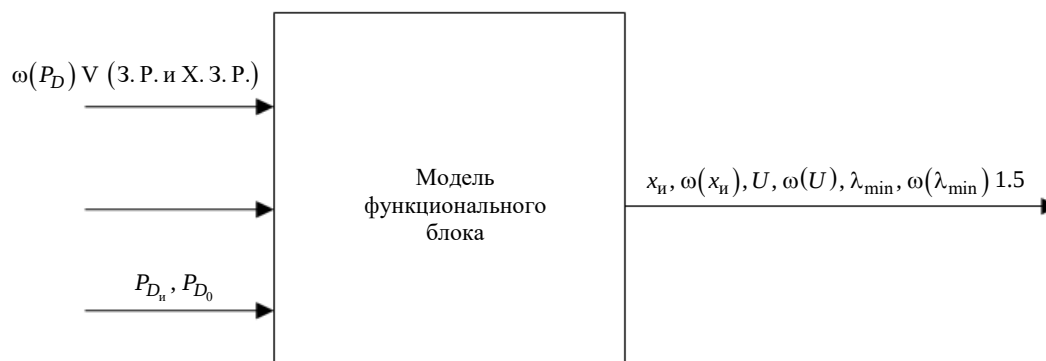


Рис. 4. Модель функционального блока

Fig. 4. Functional block model

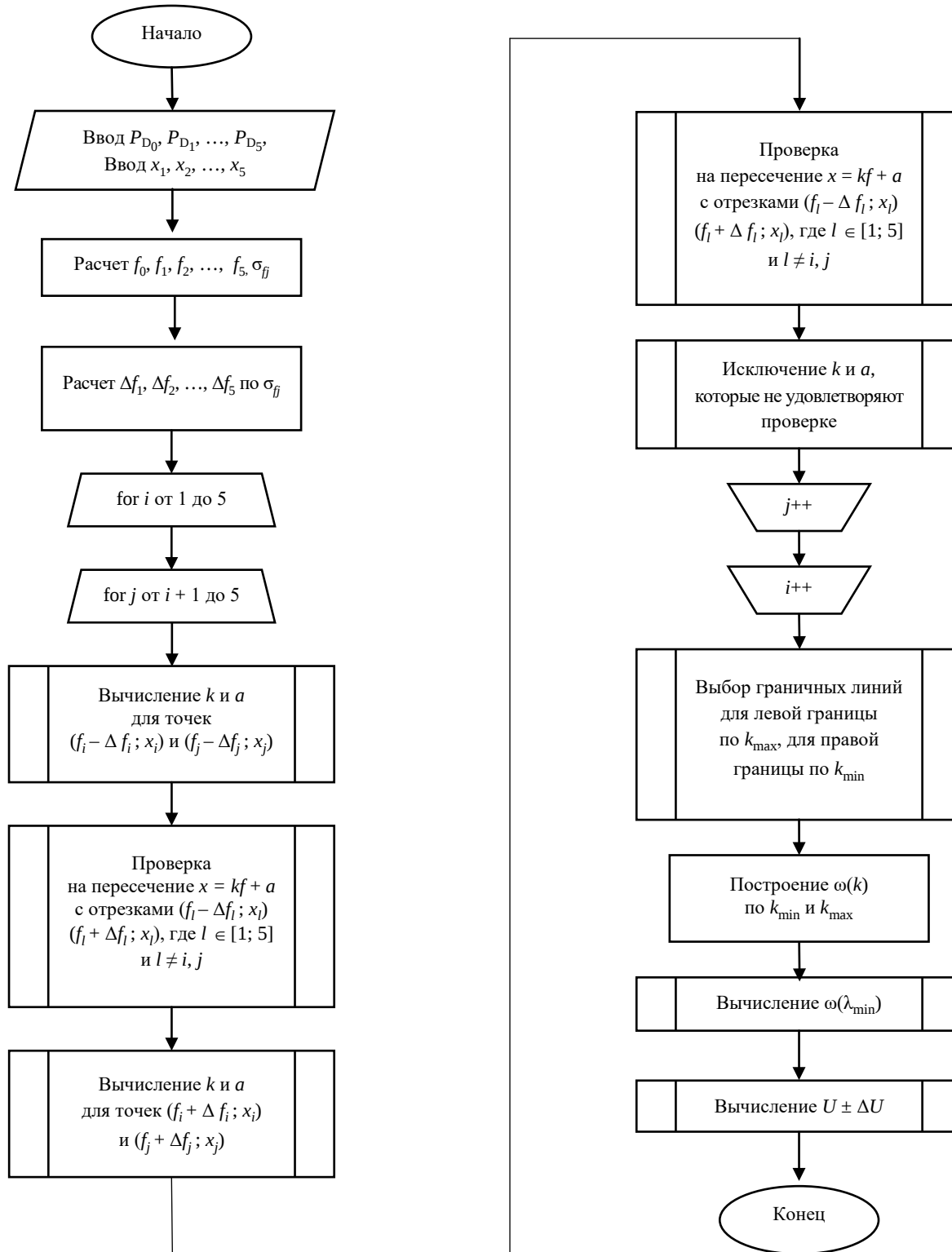


Рис. 5. Алгоритм работы типового функционального блока программной системы

Fig. 5. Operation algorithm of a typical functional block of the software system

**Результаты.** Продемонстрируем работу алгоритма при выборе граничных линий для левой границы по  $k_{\max}$ , для правой границы по  $k_{\min}$ .

Для эталонных значений:  $\frac{P_{D1}}{P_{D0}} = 1.9$ ;  $x_1 = 2$ ;

$\frac{P_{D2}}{P_{D0}} = 3.9$ ;  $x_2 = 4$ ;  $\frac{P_{D3}}{P_{D0}} = 6.1$ ;  $x_3 = 6$  строится

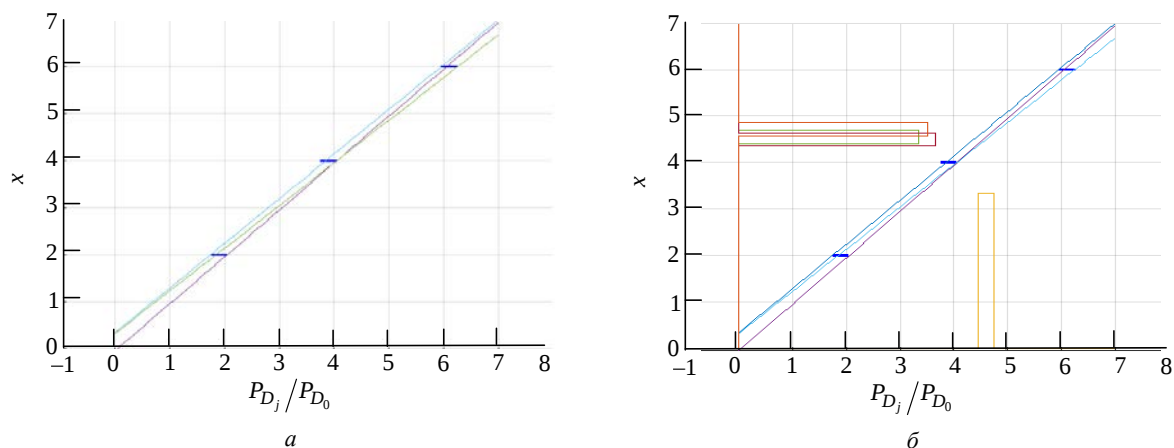


Рис. 6. Выбор  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  при равномерном законе распределения измеряемой величины

Fig. 6. Choice of  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  with a uniform distribution law of the measured value

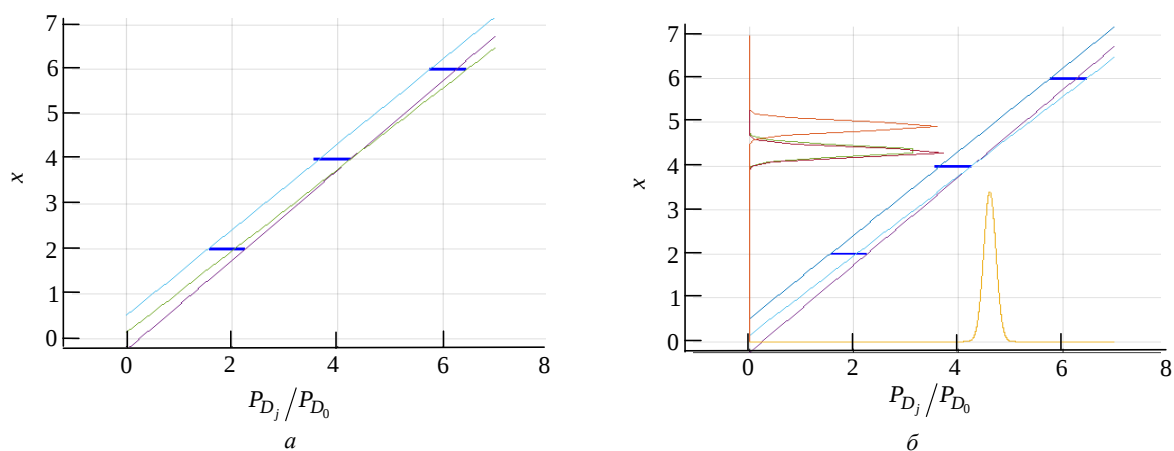


Рис. 7. Выбор  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  при нормальном законе распределения измеряемой величины

Fig. 7. Choice of  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  with the normal distribution law of the measured value

линейная зависимость  $x \left( \frac{P_{Dj}}{P_{D0}} \right)$  для правой и

левой границ возможных значений характеристики преобразования, при равномерном законе распределения, с учетом интервала  $\frac{P_{D_{\text{и}}}}{P_{D_0}}$

[4.45; 4.75] для искомого значения  $x_{\text{и}}$  (рис. 6).

Для эталонных значений:  $\frac{P_{D_1}}{P_{D_0}} = 1.9$ ;  $x_1 = 2$ ;

$\frac{P_{D_2}}{P_{D_0}} = 3.9$ ;  $x_2 = 4$ ;  $\frac{P_{D_3}}{P_{D_0}} = 6.1$ ;  $x_3 = 6$  строится

линейная зависимость  $x \left( \frac{P_{Dj}}{P_{D0}} \right)$  для правой и

левой границ возможных значений характеристики преобразования, с учетом

СКО = 0.12 и  $\frac{P_{D_{\text{и}}}}{P_{D_0}} = 4.6$  для искомого значения

$x_{\text{и}}$  и с доверительной вероятностью  $P = 0.95$  при нормальном законе распределения (рис. 7).

Для эталонных значений:  $\frac{P_{D_1}}{P_{D_0}} = 1.9$ ;  $x_1 = 2$ ;

$\frac{P_{D_2}}{P_{D_0}} = 3.9$ ;  $x_2 = 4$ ;  $\frac{P_{D_3}}{P_{D_0}} = 6.1$ ;  $x_3 = 6$  строится

линейная зависимость  $x \left( \frac{P_{Dj}}{P_{D0}} \right)$  для правой и

левой границ возможных значений характеристики преобразования, при законе распределения

Симпсона, с учетом разброса  $l = 0.15$  и  $\frac{P_{D_{\text{и}}}}{P_{D_0}} = 4.6$

для искомого значения  $x_{\text{и}}$  (рис. 8).

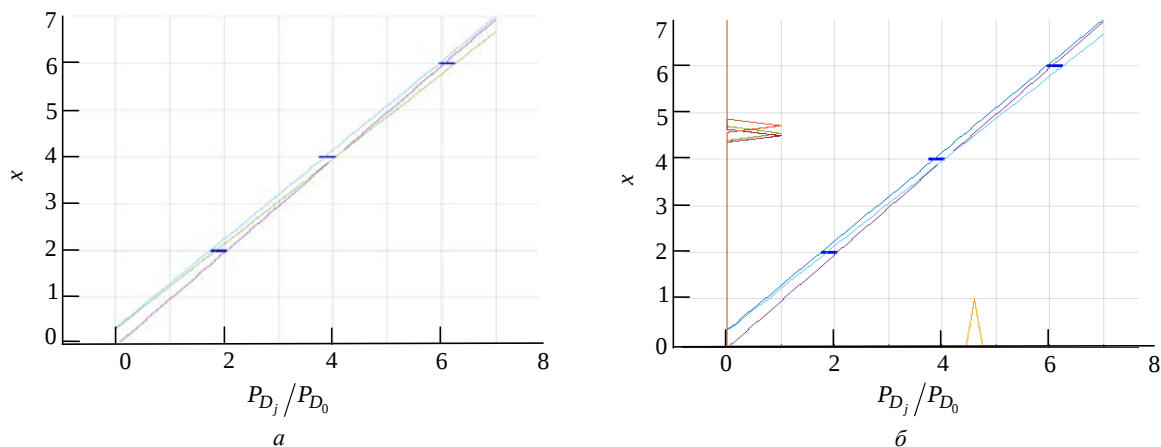


Рис. 8. Выбор  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  при законе распределения Симпсона измеряемой величины

Fig. 8.  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  selection under the Simpson distribution law of the measured value

Плотность распределения эффективного коэффициента ослабления  $\omega(\mu_{\text{эф}}) = \omega(k) = \omega(\text{tg } \alpha_{\text{см}})$  (см. рис. 3) определяется, исходя из выражения  $\mu_{\text{эф}} = \frac{x-b}{f_j}$ , тогда  $\omega(\mu_{\text{эф}}) = \frac{b-x}{f_j^2} \omega(f_j)$ .

При расчете  $\lambda_{\min}$  согласно (1) плотность распределения величины для длины волны  $\omega(\lambda_{\min})$  с учетом  $\text{tg } \alpha_{\text{см}} = \mu_{\text{эф}}$  будет определяться по выражению [18]

$$\omega(\lambda_{\min}) = \frac{\partial \lambda_{\min}}{\partial \mu_{\text{эф}}} \omega(\mu_{\text{эф}}),$$

$$\omega(\lambda_{\min}) = \frac{\omega(\mu_{\text{эф}})}{\sqrt{159524 \mu_{\text{эф}} - 149458}}.$$

При математическом ожидании  $M(\mu_{\text{эф}}) = 1.5 \text{ см}^{-1}$ , среднеквадратичном отклонении  $\sigma_{\mu_{\text{эф}}} = 0.01 \text{ см}^{-1}$  и нормальном распределении  $\mu_{\text{эф}}$  закон распределения  $\lambda_{\min}$  будет отличаться от нормального и соответствовать оранжевой линии на рис. 9, а; при равномерном законе распределения  $\mu_{\text{эф}}$  на интервале [1,49; 1,51] закон распределения  $\lambda_{\min}$  будет соответствовать оранжевой линии на рис. 9, б; при законе распределения Симпсона:

$$\omega(\mu_{\text{эф}}) = \begin{cases} 0, & \text{при } \mu_{\text{эф}} < a-l; \\ \frac{\mu_{\text{эф}} - a + l}{l^2}, & \text{при } a-l \leq \mu_{\text{эф}} < a; \\ \frac{l - \mu_{\text{эф}} + a}{l^2}, & \text{при } a \leq \mu_{\text{эф}} < a+l; \\ 0, & \text{при } \mu_{\text{эф}} > a+l, \end{cases}$$

где  $l = 0.1$  и  $a = 1.5$ , закон распределения  $\lambda_{\min}$  будет соответствовать оранжевой линии на рис. 9, в; при трапецидальном законе распределения:

$$\omega(\mu_{\text{эф}}) = \begin{cases} 0, & \text{при } \mu_{\text{эф}} < \mu_{\text{эфЦ}} - a; \\ \frac{\mu_{\text{эф}} - \mu_{\text{эфЦ}} + a}{a^2 - b^2}, & \text{при } \mu_{\text{эфЦ}} - a \leq \mu_{\text{эф}} \leq \mu_{\text{эфЦ}} - b; \\ \frac{1}{a+b}, & \text{при } \mu_{\text{эфЦ}} - b \leq \mu_{\text{эф}} \leq \mu_{\text{эфЦ}} + b; \\ \frac{\mu_{\text{эфЦ}} + a - \mu_{\text{эф}}}{a^2 - b^2}, & \text{при } \mu_{\text{эфЦ}} + b \leq \mu_{\text{эф}} \leq \mu_{\text{эфЦ}} + a; \\ 0, & \text{при } \mu_{\text{эф}} > \mu_{\text{эфЦ}} + a, \end{cases}$$

где  $a = 0.4$ ,  $b = 0.1$  и  $\mu_{\text{эфЦ}} = 1.5$ , закон распределения  $\lambda_{\min}$  будет соответствовать оранжевой линии на рис. 9, г.

Амплитуда импульса напряжения на ИРТ определяется согласно (2), а плотность распределения амплитуды по формуле

$$\omega(U) = -\omega(\lambda_{\min}) \frac{1.24}{\lambda_{\min}^2}.$$

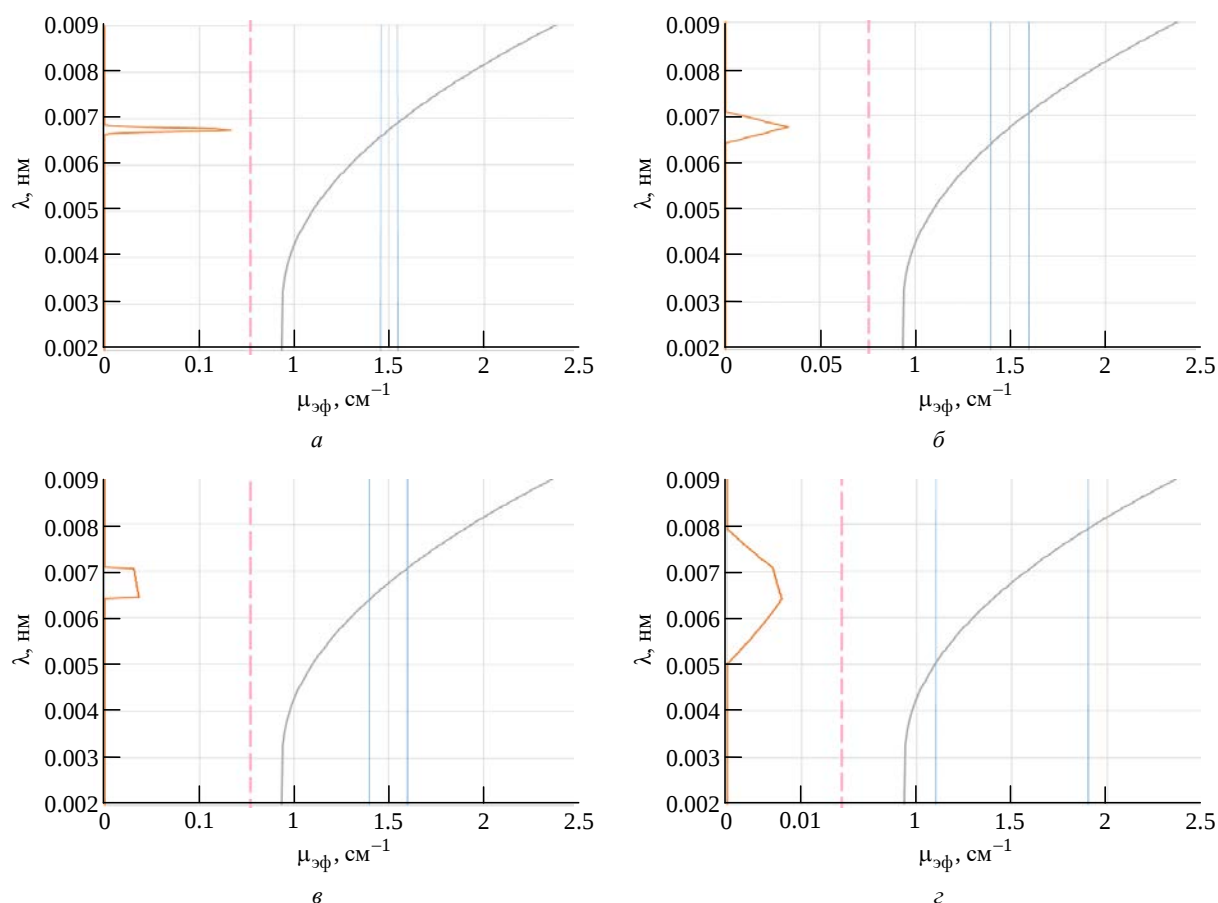


Рис. 9. Определение длины волны  $\lambda$  по вычисленному значению эффективного коэффициента ослабления  $\mu_{\text{эф}}$

Fig. 9. Determination of the wavelength  $\lambda$  based on the calculated value of the effective attenuation coefficient  $\mu_{\text{эф}}$

**Заключение и выводы.** При метрологическом анализе важно пользоваться средствами моделирования, которые должны учитывать характеристики преобразования и распределение вероятностей измеряемых величин. Для этой цели предлагается использовать разработанное алгоритмическое обеспечение (см. рис. 5), учитывающее функциональную зависимость искомой величины от измеряемой, погрешность определения функциональной зависимости и плотность распределения случайной входной величины. Корректность программно-алгоритмического обеспечения типовых функциональных блоков программной системы подтверждена приведенными примерами, ко-

торые были реализованы расчетным методом, а также тестированием созданного программного обеспечения в среде графического программирования на языке G и в программной системе GNU Octave. Предлагаемое программно-алгоритмическое обеспечение позволит проводить обработку результатов измерительного эксперимента с минимальными временными затратами, которое будет обусловлено временем, затраченным на ввод входных данных для дальнейшей работы программного средства, что существенно ускорит решение задачи метрологического анализа, а также увеличит информативность полученных результатов рентгеноспектрального анализа.

### Список литературы

1. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Разработка и совершенствование процедур измерений, испытаний и контроля на предприятиях авиационной промышленности и воздушного транспорта // Мир измерений. 2019. № 4. С. 6–9.

2. Краснодубец Л. А., Пеньков М. Н. Компьютерное моделирование гидростатического измерителя плотности морской воды // Системы контроля

окружающей среды. 2020. Вып. 1 (39). С. 71–76. doi: 10.33075/2220-5861-2020-1-71-76

3. Климентьев К. Е. Имитационное моделирование метрологических аспектов измерительных систем // ИТМУ-17: Информационные технологии моделирования и управления: междунар. сб. науч. тр. Вып. 17. Воронеж: Науч. кн., 2004. С. 132–137.

4. Вовна А. В., Зори А. А., Тарасюк В. П. Алго-

Математическое и программное обеспечение для определения погрешности

при решении задач метрологического анализа

Mathematical Support and Software for Determining the Error  
in Solving Metrological Analysis Problems

ритм и имитационная математическая модель измерительного канала температуры для обработки экспериментальных данных // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2010. № 5. С. 1–5.

5. Цветков Э. И. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 293 с.

6. Романцова Н. В., Сулоева Е. С. Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при моделировании средства измерения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 4. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1068> (дата обращения: 25.06.2024). doi: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017

7. Романцова Н. В., Сулоева Е. С. Модель измерительного блока, учитывающая влияние внешних факторов на изменение полной погрешности измерительного тракта // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10, № 4. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1248> (дата обращения: 25.06.2024) doi: 10.26102/2310-6018/2022.39.4.013

8. Электровакуумная техника, приборы и устройства / А. Ю. Грязнов, Д. К. Кострин, А. А. Лисенков, Н. Н. Потрахов, Е. Д. Прялухин. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2018. 260 с.

9. Алхимов Ю. В., Ефимов П. В., Сертаков Ю. И. Цифровые радиационные системы неразрушающего контроля. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 150 с.

10. Рентгеновские трубки: устройства, применения, проблемы электрической прочности / Г. Л. Брусиловский, Н. А. Куликов, А. Н. Малков и др. СПб.: Изд-во СПбГТИ (ТУ), 2012. 184 с.

11. Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. О технологиях рентгеновских систем для контроля электронных компонентов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 113–121. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121

12. Сергунова К. А., Ахмад Е. С., Потрахов Н. Н. Методика оценки отношения сигнал/шум магнитно-резонансных изображений // Медицинская техника. 2019. Т. 315, № 3. С. 41–43.

13. Установки для рентгеновского контроля (обзор) / Н. Н. Потрахов, В. Б. Бессонов, А. В. Ободовский, А. Ю. Грязнов, В. В. Клонов, А. И. Мазуров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 10. С. 35–42. doi: 10.26896/1028-6861-2019-85-10-35-42

14. Блинов Н. Н., Мазуров А. И. Состояние российской рентгенотехники и перспективы ее развития // Медицинская техника. 2012. Т. 275, № 5. С. 1–3.

15. Блинов А. Б., Блинов Н. Н., Ярославский В. Л. Развитие рентгенотехники в России // Радиология – практика. 2015. № 1. С. 51–59.

16. Лукьянченко Е. М., Грязнов А. Ю. Моделирование спектра первичного рентгеновского излучения в энергодисперсионном рентгеноспектральном анализе // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2003. № 8. С. 10–14.

17. Микрофокусная рентгенография: результаты исследований Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов, К. К. Жамова, В. Б. Бессонов, Ю. Н. Потрахов // Территория NDT. 2016. № 3. С. 54–57.

18. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. 12-е изд., перераб. и доп. М.: Едиториал URSS, 2019. 456 с.

### Информация об авторах

**Романцова Наталия Владимировна** – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 59 научных работ. Сфера научных интересов – информационно-измерительные системы; метрологический анализ; измерение импульсных магнитных полей. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: [nvromantsova@mail.ru](mailto:nvromantsova@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

**Жданова Екатерина Николаевна** – кандидат технических наук (2019), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 23 научной работы. Сфера научных интересов – информационно-измерительные системы; геоинформационные технологии; магнитные измерения. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: [enzhdanova@etu.ru](mailto:enzhdanova@etu.ru)  
<https://orcid.org/0009-0006-2281-2781>

### References

1. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. Developing and Improving the Procedures of Measurement, Tests and Control at The Enterprises of the Aerospace Industry and Air Transport. *Mir Izmerenii* [Measurements World]. 2019, no. 4, pp. 6–9. (In Russ.)

2. Krasnodubets L. A., Penkov M. N. Computer Simulation of a Hydrostatic Seawater Density Meter. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy* [Environmental Control Systems]. 2020, iss. 1 (39), pp. 71–76. doi: 10.33075/2220-5861-2020-1-71-76 (In Russ.)

3. Klimentiev K. E. Simulation Modeling of Metrological Aspects of Measuring Systems. ITMU-17: Information Technologies of Modeling and Management. Intern. Collection of Scientific Papers. Iss. 17. Voronezh, Scientific book, 2004, pp. 132–137. (In Russ.)
4. Vovna A. V., Zori A. A., Tarasyuk V. P. Algorithm and Simulation Mathematical Model of a Temperature Measuring Channel for Processing Experimental Data. *Izvestiya SFU. Tekhnicheskie nauki*. [News SFU. Technical sciences]. 2010, no. 5, pp. 1–5. (In Russ.)
5. Tsvetkov E. I. *Metrologiya. Modeli. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez* [Metrology. Models. Metrological analysis. Metrological synthesis]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2014, 293 p. (In Russ.)
6. Romantsova N. V., Suloeva E. S. Mathematical and Software Tools for Determining the Error in Modeling a Measuring Instrument. Modeling, Optimization and Information Technology. 2021, vol. 9, no. 4. Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1068> (accessed 25.06.2024). doi: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017 (In Russ.)
7. Romantsova N. V. Suloeva E. S. The Model of the Measuring Unit with Consideration for the Influence of External Factors on the Change in the Total Error of the Measurement Channel. Modeling, Optimization and Information Technology. 2022, vol. 10, no. 4. Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1248> (accessed 25.06.2024). doi: 10.26102/2310-6018/2022.39.4.013 (In Russ.)
8. Gryaznov A. Yu., Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Potrakhov N. N., Pryalukhin E. D. *Elektrovakuumnaya tekhnika, pribory i ustroystva* [Electrovacuum Technology, Instruments and Devices]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2018, 260 p. (In Russ.)
9. Alkhimov Yu. V., Efimov P. V., Sertakov Yu. I. *Tsifrovye radiatsionnye sistemy nerazrushayushchego kontrolya* [Digital radiation non-destructive testing systems]. Tomsk, *Izd-vo TPU*, 2012, p. 150. (In Russ.)
10. Brusilovsky G. L., Kulikov N. A., Malkov A. N., etc. *Rentgenovskie trubki: ustroystva, primeneniya, problemy elektricheskoi prochnosti* [X-ray Tubes: Devices, Applications, Problems of Electrical Strength]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGTI (TU)*, 2012, 184 p. (In Russ.)
11. Mazurov A. I., Potrakhov N. N. About Technologies of X-Ray Systems for Control of Electronic Components. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 113–121. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121 (In Russ.)
12. Sergunova K. A., Akhmad E. S., Potrakhov N. N. Methodology for Evaluating the Signal-to-Noise Ratio of Magnetic Resonance Images. Medical Equipment. 2019, vol. 315, no. 3, pp. 41–43. (In Russ.)
13. Potrakhov N. N., Bessonov V. B., Obodovskiy A. V., Gryaznov A. Yu., Klonov V. V., Mazurov A. I. Design of X-Ray Units for Inspection Applications (Review). Industrial Laboratory. Materials Diagnostics. 2019, vol. 85, no. 10, pp. 35–42. doi: 10.26896/1028-6861-2019-85-10-35-42 (In Russ.)
14. Blinov N. N., Mazurov A. I. The State of Russian X-Ray Technology and Prospects for Its Development. Medical Equipment. 2012, vol. 275, no. 5, pp. 1–3. (In Russ.)
15. Blinov A. B., Blinov N. N., Yaroslavsky V. L. Development of X-Ray Equipment in Russia. Radiology and Practice. 2015, no. 1, p. 51–59. (In Russ.)
16. Lukyanchenko E. M., Gryaznov A. Y. Simulation of the Primary X-Ray Spectrum in the Energy-Dispersive Analysis. Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2003, no. 8, pp. 10–14. (In Russ.)
17. Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Zhamova K. K., Bessonov V. B., Potrakhov Yu. N. Microfocus Radiography: Research Results of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The Territory of NDT. 2016, no. 3, pp. 54–57. (In Russ.)
18. Gnedenko B. V. *Kurs teorii veroyatnostei* [Course of Probability Theory]. 12<sup>nd</sup> ed. Moscow, Editorial URSS, 2019, 456 p. (In Russ.)

### Information about the authors

**Natalia V. Romantsova**, Can. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor of the Department of Information-measuring Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 59 scientific publications. Area of expertise: information and measurement systems; metrological analysis; measurement of pulsed magnetic fields.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: [nvromantsova@mail.com](mailto:nvromantsova@mail.com)

<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

**Ekaterina N. Zhdanova**, Cand. Sci. (Eng.) (2019), Associate Professor of the Department of Information-measuring Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 23 scientific publications. Area of expertise: information and measurement systems; geoinformation technologies; magnetic measurements.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: [enzhdanova@etu.ru](mailto:enzhdanova@etu.ru)

<https://orcid.org/0009-0006-2281-2781>

## Методы интраоперационной диагностики в пункционной малоинвазивной хирургии рака печени

Е. В. Потапова✉

Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Орел, Россия

✉ potapova\_ev\_ogu@mail.ru

### Аннотация

**Введение.** Рак печени занимает лидирующие позиции среди причин смерти от онкологии. Окончательный диагноз о наличии злокачественной патологии определяется по результатам патоморфологического анализа биоптата, полученного в ходе проведения чрескожной пункционной биопсии печени. Несмотря на преимущества этого метода диагностики, у него есть недостатки, в том числе возможность забора недиагностических образцов и долгое ожидание описания результатов. Поэтому необходима разработка дополнительных методов диагностики, позволяющих улучшить качество хирургической помощи пациентам с онкологией. Оптические методы являются чувствительным инструментом для определения метаболических особенностей биотканей, поэтому их использование может помочь повысить эффективность традиционных пункционных диагностических процедур за счет разработки подходов к экспресс-диагностике типа новообразований печени.

**Цель работы.** Разработка методов интраоперационной диагностики в пункционной малоинвазивной хирургии рака печени *in vivo*, которые позволяют различать паренхиму и опухоли печени, а также классифицировать типы новообразований (первичные злокачественные, метастазы и доброкачественные) на основе методов оптической спектроскопии с использованием машинного обучения.

**Материалы и методы.** Использованы методы клинических исследований, описательной математической статистики и машинного обучения.

**Результаты.** Предложены спектроскопические методы интраоперационной диагностики, апробированные в клинике. Достигнуты высокие показатели диагностической точности в ходе чрескожной пункционной биопсии новообразований печени. Применение разработанных классификаторов обеспечивает выявление патологических изменений с чувствительностью и специфичностью 0.90 и 0.95 соответственно. При обнаружении опухолевой ткани возможна дифференциация типа новообразования с чувствительностью и специфичностью, достигающими 0.80 и 0.95.

**Заключение.** Последние достижения в области оптики позволили реализовать и внедрить оптические технологии в мини-инвазивную область хирургии, в частности, интегрировать тонкоигльные оптоволоконные зонды в стандартные пункционные иглы. Описываемые в статье методы позволяют быстрее сделать предварительное заключение о типе опухоли за счет автоматизированной обработки данных, полученных методами оптической спектроскопии непосредственно в процессе пункционных вмешательств. Это позволит увеличить точность и надежность пункционной биопсии, что имеет первостепенное значение при определении персонализированной стратегии лечения.

**Ключевые слова:** опухоли печени, чрескожная пункционная биопсия, флуоресцентная спектроскопия, флуоресцентная спектроскопия с временным разрешением, спектроскопия диффузного отражения

**Для цитирования:** Потапова Е. В. Методы интраоперационной диагностики в пункционной малоинвазивной хирургии рака печени // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 106–119. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-106-119

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РНФ № 18-15-00201 и № 21-15-00325.

Статья поступила в редакцию 04.08.2024; принята к публикации после рецензирования 21.10.2024; опубликована онлайн 27.12.2024

## Methods of Intraoperative Diagnosis in Puncture Minimally Invasive Surgery of Liver Cancer

Elena V. Potapova ✉

Orel State University, Orel, Russia

✉ potapova\_ev\_ogu@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** Liver cancer is a leading cause of death in oncology. The final diagnosis is determined by a pathomorphological analysis of tissue specimens obtained during percutaneous puncture biopsy. Despite its obvious advantages, this method is associated with the possibility of obtaining nondiagnostic specimens and the need for long wait times. Therefore, additional diagnostic methods should be developed to improve the quality of surgical care for oncology patients. Optical methods are a sensitive tool for determining the metabolic characteristics of biotissues. Such methods may improve the efficacy of conventional puncture procedures by developing approaches for rapid diagnosis of liver neoplasm types.

**Aim.** Development of intraoperative diagnostic methods for in vivo minimally invasive liver cancer surgery that allow differentiation between liver parenchyma and tumors, as well as classification of neoplasm types (primary malignant, metastatic, and benign) based on optical spectroscopy and machine learning.

**Materials and methods.** The methods of clinical research, descriptive mathematical statistics, and machine learning were used.

**Results.** Spectroscopic methods of intraoperative diagnostics, tested in clinic settings, are proposed. These methods demonstrated high diagnostic accuracy during percutaneous puncture biopsy of liver neoplasms. Application of the developed classifiers enables detection of pathological changes with a sensitivity and specificity of 0.90 and 0.95, respectively. When a tumor tissue is detected, differentiation of neoplasm type is possible with a sensitivity and specificity reaching 0.80 and 0.95, respectively.

**Conclusion.** Recent advances in optics have enabled the implementation of optical technologies in minimally invasive surgery, particularly the integration of fiber optic probes into standard puncture needles. The methods described in this paper facilitate preliminary conclusion about the tumor type with automated processing of optical spectroscopy data during puncture interventions. The application of these methods in clinical practice will increase the accuracy and reliability of puncture biopsy, which is essential in determining a personalized treatment strategy.

**Keywords:** liver tumors, percutaneous puncture biopsy, fluorescence spectroscopy, time-resolved fluorescence spectroscopy, diffuse reflectance spectroscopy

**For citation:** Potapova E. V. Methods of Intraoperative Diagnosis in Puncture Minimally Invasive Surgery of Liver Cancer. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 106–119. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-106-119

**Conflict of interest.** The author declares no conflicts of interest.

**Source of funding.** This work was supported by Russian Science Foundation under projects No. 18-15-00201 and No. 21-15-00325.

Submitted 04.08.2024; accepted 21.10.2024; published online 27.12.2024

**Введение.** Первичный и вторичный (метастазы, образовавшиеся в результате распространения раковых клеток из первичной опухоли, локализованной в другом органе) онкопроцессы в печени занимают лидирующие позиции среди основных причин смерти от онкологии во всем мире [1]. Прогноз течения заболевания сильно коррелирует с задержкой диа-

гностики [2], и раннее выявление болезни – залог успешного лечения и выздоровления. Операции, проведенные на первых стадиях рака печени, как правило, дают хорошие результаты. При обследовании пациентов с подозрением на рак печени предпочтение отдается методам медицинской интроскопии [3]. Их диагностическая эффективность зависит от размеров

Методы интраоперационной диагностики в пункционной малоинвазивной хирургии рака печени

107

Methods of Intraoperative Diagnosis in Puncture Minimally Invasive Surgery of Liver Cancer

опухоли, ее морфологических особенностей, а также от заболеваний и состояния печени [4]. Окончательный диагноз о наличии злокачественной патологии формулируется по результатам патоморфологического анализа биоптата, полученного в процессе чрескожной пункционной биопсии печени (ЧПБ) под контролем ультразвуковой навигации [5]. Одна из проблем ЧПБ – высокая вероятность взятия проб с недиагностической ценностью для цитологии или гистопатологии. При анализе опубликованных данных о неадекватном отборе проб при тонкоигольной ЧПБ различных органов под ультразвуковым контролем было выявлено, что частота выборки неинформативных образцов зависела от опыта врача, проводящего диагностику, а также функциональных перестроек в нормальной ткани органов и по различным данным составляла до 15...25 % [6–8]. Морфологическая классификация опухолей является объективной, но требует времени и высокой квалификации специалистов. При этом определение типа опухоли влияет на лечебный алгоритм и может обуславливать проведение дополнительных диагностических процедур и срочную маршрутизацию пациентов в специализированные центры [9, 10]. В связи с этим актуальна разработка методов диагностики, способных непосредственно во время обследования дифференцировать области опухоли и паренхимы, а также определять уровень злокачественности и происхождение опухоли (первичная или вторичные опухолевые очаги) печени.

Оптические методы – мощный инструмент для определения метаболических особенностей биотканей, поэтому их использование может помочь повысить эффективность традиционных пункционных диагностических процедур. Кроме того, достижения в области оптики позволяют интегрировать тонкоигольные оптоволоконные зонды в стандартные пункционные хирургические инструменты, обеспечивая регистрацию сигналов различной природы из одного диагностического объема с реализацией мультимодального подхода к оптической диагностике [11, 12].

Флуоресцентная спектроскопия (ФС) и спектроскопия диффузного отражения (СДО) активно применяются в качестве инструментов оценки состояния биологических тканей, в том

числе при определении их злокачественности *in vivo* [13–16]. Выраженной автофлуоресценцией при облучении биотканей светом видимого и инфракрасного диапазонов обладает ряд эндогенных флуорофоров, в том числе коферменты НАДН (восстановленный никотинамидадениндинуклеотид) и ФАД (флавинадениндинуклеотид). Метаболические перестройки, опосредованные опухолью, изменяют содержание данных биологических веществ, определяя флуоресцентные различия между неизмененными и онкологическими тканями [17–20]. Кофермент НАДН имеет компоненты с коротким и длительным временами жизни в зависимости от его статуса связывания с белками. По изменению относительного соотношения свободного и связанного НАДН можно оценить клеточный метаболический редокс-статус [21]. Метод ФС с временным разрешением позволяет регистрировать кривые затухания эндогенных флуорофоров и является более высокочувствительным инструментом для оценки биохимических изменений в тканях [22]. На отражательную способность биологических тканей влияет их морфология (в том числе размер ядер), содержание крови и ее оксигенация, которые сопровождают патологические трансформации, в том числе при неоваскуляризации опухолей. Сочетание двух методов оптической диагностики – ФС и СДО – в одной диагностической технологии может дать больше информации о перфузионно-метаболических перестройках опухолевых тканей.

Возможность регистрировать оптические сигналы через зонды малого диаметра легла в основу разработки целого ряда устройств для применения в пункционной малоинвазивной хирургии различных органов. Перспективы оптической биопсии в малоинвазивной пункционной хирургии были исследованы несколькими научными группами для различных органов и систем *ex vivo* и частично *in vivo*, в том числе с целью выявления онкологии головного мозга [23], молочной железы [24–26], легких [27–29]. Для оптической биопсии печени с целью дифференциации опухолевых тканей и паренхимы печени в *ex vivo* исследованиях описаны устройства, созданные с помощью метода СДО [30, 31]. В [32] описана система

для получения оптических характеристик колоректальных метастазов в печени человека *in vivo*, но не было предложено классификатора для дифференциации типов тканей. Также *in vivo* диагностика опухолей печени описана в [33], но используемый зонд (15G) имеет достаточно большой диаметр для проведения исследований в пункционной малоинвазивной хирургии и применялся авторами при открытой операции.

Для улучшения эффективности методов диагностики все чаще используются методы машинного и глубокого обучения. Их преимущество – возможность анализа массивных многопараметрических данных, включая оптические [34], для извлечения значимой информации о клиническом диагнозе и решениях о лечении пациента.

Цель работы, описываемой в данной статье, – создание методов интраоперационной диагностики в пункционной малоинвазивной хирургии рака печени *in vivo*, которые позволяют различать паренхиму и опухоли печени, а также классифицировать типы новообразований (первичные злокачественные, метастазы и доброкачественные) на основе методов оптической спектроскопии с использованием машинного обучения.

**Материалы и методы.** Методы интраоперационной диагностики в пункционной малоинвазивной хирургии рака печени были разработаны на основе исследований, проводимых с помощью двух оригинальных устройств.

Схема мультимодальной спектроскопиче-

ской системы для *in vivo* регистрации спектров тканей печени через тонкоигольный оптоволоконный зонд методами ФС и СДО приведена на рис. 1 [35].

Блок излучения системы состоит из двух диодных источников излучения с длинами волн 365 и 450 нм и широкополосного галогенного (360...2400 нм) источника излучения. Оптические фильтры предназначены для ослабления обратнорассеянного излучения в канале ФС. Доставка и сбор оптического излучения осуществляются с помощью оптоволоконного зонда с жестким окончанием в виде иглы малого диаметра (1 мм) длиной 220 мм. Зонд содержит 10 оптических волокон: 9 передающих (диаметр 100 мкм) и одно принимающее (диаметр 200 мкм). Такая конфигурация повышает эффективность освещения биоткани и сбора диффузно отраженного и флуоресцентного оптического излучения. Свет, собранный зондом, регистрируется ПЗС-спектрометром. Управление устройством и обработка полученных данных проводятся с помощью компьютера в специально разработанной программной среде. Время экспозиции для измерения одного спектра ФС – 1.5 с, спектра СДО – 0.05 с. Перед каждой серией измерений устройство калибровали.

На рис. 2 приведена схема оригинального устройства для регистрации спектров затухания флуоресценции. Система рассчитана на регистрацию флуоресценции кофермента мета-

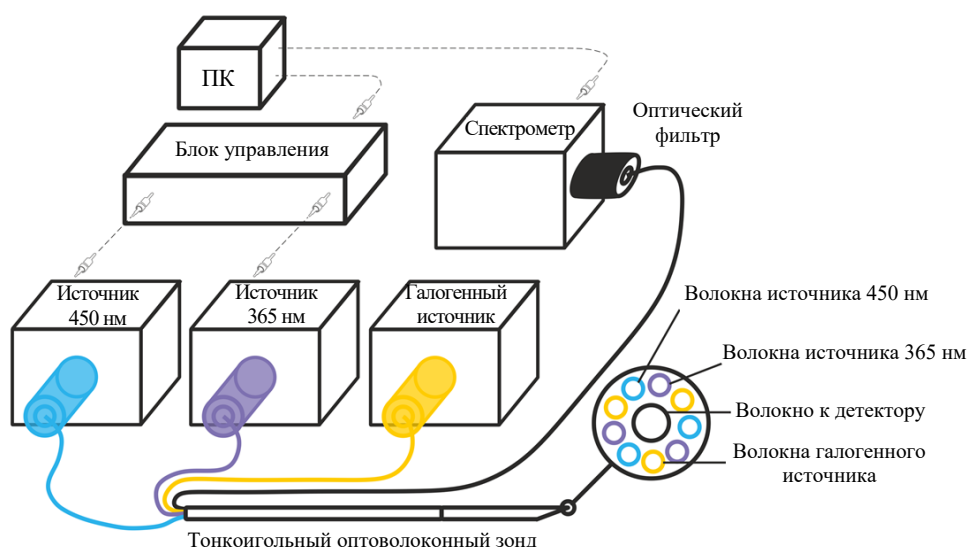


Рис. 1. Структурная схема мультимодальной спектроскопической системы

Fig. 1. Block diagram of a multimodal spectroscopic system

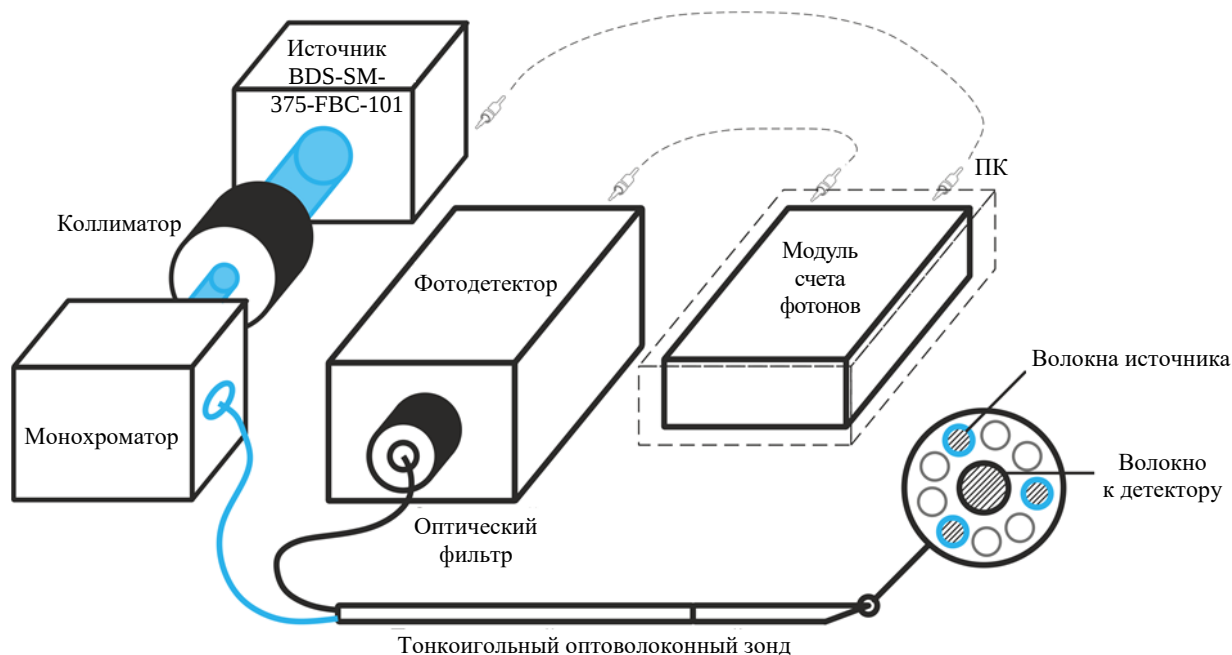


Рис. 2. Структурная схема устройства ФС с временным разрешением

Fig. 2. Block diagram of a time-resolved fluorescence spectroscopy

близма НАДН в его свободном и связанном с белками состояниях.

Основные блоки системы – источник возбуждения флуоресценции – пикосекундный диодный лазер BDS-SM-375-FBC-101 с длиной волны 375 нм и гибридный фотодетектор. Для выделения интересующей спектральной области флуоресцентного излучения использовался полосовой оптический фильтр. Подсчет фотонов в модуле счета фотонов и окончательная обработка данных проводятся с помощью специального программно-алгоритмического обеспечения на компьютере. Время экспозиции для измерения одного спектра – 1 с. Для валидации данных, полученных с помощью системы ФС с временным разрешением и оптоволоконного зонда, описанного ранее, регистрировали кривые затухания флуоресценции свежих растворов НАДН, разбавленных в концентрациях, соответствующих их возможному концентрации в живой клетке [37].

На этапе разработки метода дифференциации новообразований печени от условно здоровой паренхимы с помощью мультимодального устройства, реализующего методы ФС и СДО, привлекались 20 пациентов хирургического отделения Орловской областной клинической больницы. При разработке метода клас-

сификации новообразований печени (первичный рак печени, метастазы, доброкачественные опухоли) с помощью устройства, реализующего метод ФС с временным разрешением, привлекались 25 пациентов из того же отделения. Исследования были одобрены этическим комитетом ОГУ им. И. С. Тургенева (протокол № 14 от 24.01.2019) и выполнены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях. Регистрация спектров осуществлялась во время стандартной процедуры ЧПБ под ультразвуковым контролем в тканях паренхимы печени и новообразования, характер которого подтверждался гистологическим исследованием.

**Результаты.** Для разработки метода дифференциации нормальных и опухолевых тканей печени были зарегистрированы и проанализированы спектры флуоресценции и диффузного отражения в здоровой паренхиме и в новообразовании. Типичные примеры спектроскопических сигналов приведены на рис. 3.

При анализе результатов в канале ФС было обнаружено, что пик флуоресценции на длинах волн возбуждения 365 нм ( $I_{365}$ ) и 450 нм ( $I_{450}$ ) смещается в длинноволновую область в опухолевой ткани относительно паренхимы печени.

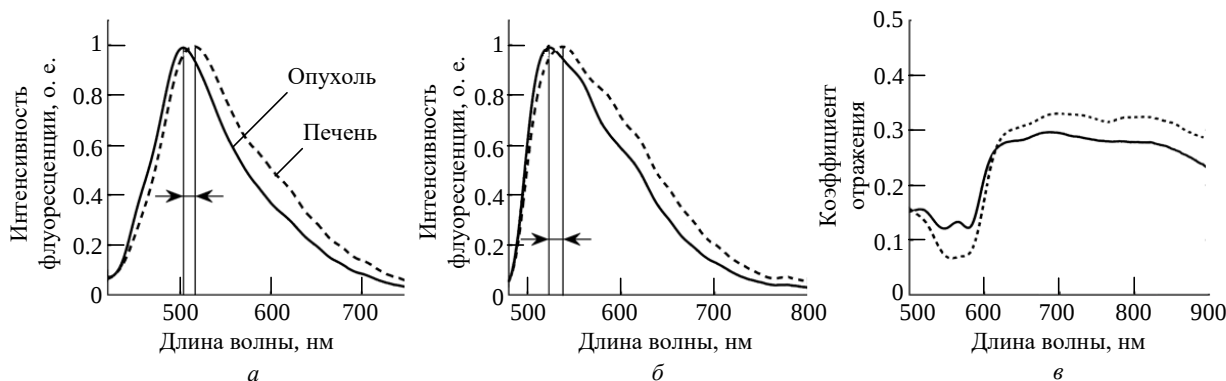


Рис. 3. Зарегистрированные в печени и опухоли спектры флуоресценции на длине волны возбуждения 365 нм (а); 450 нм (б) и диффузного отражения (в) (типичные примеры)

Fig. 3. Spectra recorded in the liver and tumor fluorescence excitation wavelengths of 365 nm (a); of 450 nm (b) and diffuse reflection (c) (typical examples)

Этот параметр может служить качественным диагностическим параметром для дифференциации типа ткани. Также было отмечено, что спектры диффузного отражения наиболее сильно различаются по форме в областях поглощения окси- и дезоксигемоглобина. Для оценки различий в оксигенации тканей был рассчитан параметр тканевой сатурации ( $StO_2$ ) с помощью подхода, описанного в [34]. Он заключается в использовании нейросетевого прогнозирования параметров, влияющих на спектры диффузного отражения, на основе обучающего набора смоделированных данных. Была обнаружена статистически значимая разница в насыщении кислородом двух типов тканей, при этом сатурация опухолевых тканей оказалась выше, чем в печеночной паренхиме.

Результаты расчетов анализируемых параметров ( $I_{365}$ ,  $I_{450}$  и  $StO_2$ ) в неизменной паренхиме печени и в опухоли представлены в табл. 1. Из-за несимметричности закона распределения данные представлены в формате Ме [Q1...Q3], где Ме – медиана; Q1 – первый квартиль; Q3 – третий квартиль.

Для определения различий между параметрами (неизменная паренхима печени и опу-

холь) использовали критерий Манна–Уитни.

Результаты патоморфологического анализа образцов, полученных при ЧПБ печени из областей, где проводилась регистрация спектров ФС и СДО, подтвердили наличие онкологии у всех пациентов: у двух человек первичный рак печени и у 18 – метастазы различного происхождения.

На рис. 4 представлены типичные кривые затухания флуоресценции, полученные с помощью устройства, реализующего метод ФС с временным разрешением, зарегистрированные в условно здоровой паренхиме печени по траектории движения к опухоли и непосредственно в опухолевом новообразовании.

Для количественной оценки затухания флуоресценции был применен алгоритм подгонки кривых по методу наименьших квадратов к модели двухэкспоненциального затухания:

$$I(t) = I_{\text{noise}} + I_0 [\alpha_1 \exp(-t/\tau_1) + \alpha_2 \exp(-t/\tau_2)],$$

где  $I(t)$  – интенсивность флуоресценции, число фотонов;  $I_{\text{noise}}$  – постоянный фоновый сигнал;  $I_0$  – интенсивность сигнала в начальный момент времени;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – относительные вклады компонент времени жизни ( $\alpha_1 + \alpha_2 = 100\%$ );

Табл. 1. Результаты расчета диагностических параметров, полученных методом ФС и СДО

Tab. 1. Calculation of diagnostic parameters obtained by fluorescence spectroscopy and diffuse reflection spectroscopy

| Область измерения | Пик амплитуды флуоресценции (возбуждение 365 нм)<br>$I_{365}$ , нм | Пик амплитуды флуоресценции (возбуждение 450 нм)<br>$I_{450}$ , нм | Тканевая сатурация $StO_2$ , % |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Паренхима печени  | 508 [505...512]                                                    | 531 [523...537]                                                    | 81.9 [79.5...82.8]             |
| Опухоль           | 502 [500...503]*                                                   | 520 [518...524]*                                                   | 86.7 [85.7...89.7]*            |

\* Статистическая значимость различий с вероятностью  $p < 0.001$ .

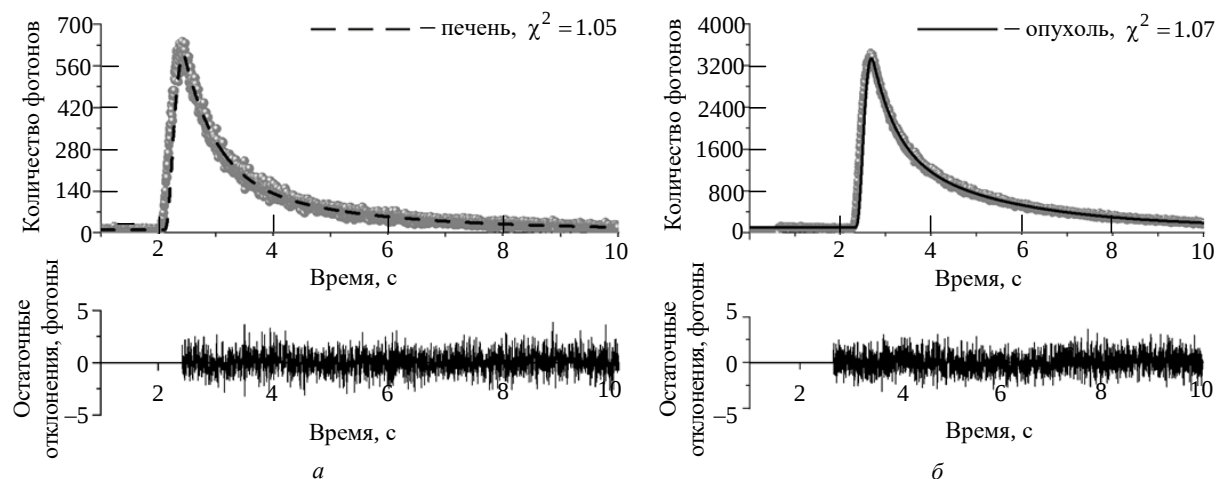


Рис. 4. Кривые затухания флуоресценции, зарегистрированные в печени (а) и опухоли (б) (типичные примеры).  
Остаточные отклонения рассчитываются как разница между модельной функцией и экспериментальными данными в каждый момент времени

Fig. 4. Fluorescence decay recorded in a liver parenchyma (a) and in a tumor (b) (typical examples).

Residual deviations are calculated as the difference between the model function and the experimental data at each time point

$\tau_1$  и  $\tau_2$  – времена жизни флуорофора ( $\tau_1$  – компонента с коротким временем жизни;  $\tau_2$  – компонента с длительным временем жизни). Хорошее соответствие характеризуется значением  $\chi^2$ , близким к 1.

По результатам гистологического анализа из 25 новообразований: 6 классифицированы как первичный рак печени; 6 – как доброкачественная опухоль и 13 – как метастазы различного происхождения.

Результаты расчетов параметров кривых затухания в условно здоровой паренхиме печени и в центре опухоли для различных типов новообразований представлены в табл. 2. Из двух связанных между собой параметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  выбран последний, так как ранее было показано, что именно он может дать больше физиологической информации при построении классификаторов [38]. Из-за несимметричности закона распределения данные также представлены в формате Me [Q1...Q3], где Me – медиана; Q1 – первый квартиль; Q3 – третий квартиль.

Для определения различий между параметрами (неизменная паренхима печени и опухоль) использовали критерий Манна–Уитни.

Для синтеза правила принятия решений с целью разделения тканей на 2 класса: опухоли и нормальные ткани, а также на классы опухолей различного типа (первичные, метастазы и доброкачественные) был рассмотрен ряд клас-

сификационных моделей.

Данные, полученные с помощью мультимодального устройства, реализующего методы ФС и СДО, были поделены на 2 класса: неизменная паренхима и опухоль печени. Было установлено, что для полученного набора данных наибольшей чувствительностью и специфичностью обладает метод опорных векторов (Support Vector Machine – SVM). Он преобразует исходное пространство данных в новое, более многомерное, где данные легче разделить гиперплоскостью. Это достигается через ядро, выполняющее нелинейное преобразование данных. Первым шагом является подготовка данных, которая включает в себя масштабирование признаков и разбиение данных на обучающую и тестовую выборки. Затем создается SVM-модель с определенным типом ядра, которая обучается на обучающей выборке. Во время обучения SVM находит оптимальную гиперплоскость, чтобы максимизировать разрыв между классами. В табл. 3 приведены параметры эффективности разработанных классификаторов при использовании всех трех диагностических параметров ( $I_{365}$ ,  $I_{450}$  и  $StO_2$ ), а также при их различном попарном сочетании.

Данные, полученные с помощью устройства, реализующего метод ФС с временным разрешением, были поделены на 3 класса: первичный рак печени, метастазы различного происхождения и доброкачественная опухоль.

Табл. 2. Результаты расчета диагностических параметров, полученных методом ФС с временным разрешением

Tab. 2. Calculation of diagnostic parameters obtained by time-resolved fluorescence spectroscopy

| Область измерения         | Интенсивность флуоресценции ( $I$ ), фотоны                                         | Короткое время жизни флуоресценции ( $\tau_1$ ), пс | Длительное время жизни флуоресценции ( $\tau_2$ ), пс | Вклад компоненты с длительным временем жизни ( $\alpha_2$ ), % |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Первичный рак печени      |                                                                                     |                                                     |                                                       |                                                                |
| Паренхима печени          | $0.48 \cdot 10^6$<br>[0.14·10 <sup>6</sup> ...1.20·10 <sup>6</sup> ]                | 520<br>[514...536]                                  | 2586<br>[2556...2762]                                 | 35.3<br>[32.3...43.0]                                          |
| Опухоль                   | $1.24 \cdot 10^6$<br>[0.55·10 <sup>6</sup> ...2.05·10 <sup>6</sup> ] <sup>***</sup> | 514<br>[506...523] <sup>***</sup>                   | 2572<br>[2537...2603] <sup>**</sup>                   | 34.3<br>[31.5...38.2] <sup>*</sup>                             |
| Метастазы                 |                                                                                     |                                                     |                                                       |                                                                |
| Паренхима печени          | $0.84 \cdot 10^6$<br>[0.63·10 <sup>6</sup> ...1.19·10 <sup>6</sup> ]                | 492<br>[469...510]                                  | 2558<br>[2468...2596]                                 | 33.8<br>[31.5...35.9]                                          |
| Опухоль                   | $0.99 \cdot 10^6$<br>[0.69·10 <sup>6</sup> ...1.66·10 <sup>6</sup> ] <sup>**</sup>  | 500<br>[484...511] <sup>**</sup>                    | 2551<br>[2520...2584]                                 | 33.8<br>[30.7...36.3]                                          |
| Доброкачественная опухоль |                                                                                     |                                                     |                                                       |                                                                |
| Паренхима печени          | $0.63 \cdot 10^6$<br>[0.35·10 <sup>6</sup> ...0.82·10 <sup>6</sup> ]                | 508<br>[479...523]                                  | 2665<br>[2600...2710]                                 | 35.4<br>[31.0...38.1]                                          |
| Опухоль                   | $0.68 \cdot 10^6$<br>[0.39·10 <sup>6</sup> ...1.20·10 <sup>6</sup> ]                | 506<br>[488...525]                                  | 2576<br>[2539...2602] <sup>***</sup>                  | 32.8<br>[31.1...36.3] <sup>*</sup>                             |

\* Статистическая значимость различий с вероятностью  $p < 0.05$ .

\*\* Статистическая значимость различий с вероятностью  $p < 0.01$ .

\*\*\* Статистическая значимость различий с вероятностью  $p < 0.001$ .

Табл. 3. Параметры эффективности предложенных классификаторов дифференциации условно здоровой паренхимы печени и опухоли на основе данных флуоресценции и диффузного отражения

Tab. 3. Efficiency parameters of the proposed classifiers for differentiation of healthy liver parenchyma and tumor based on fluorescence data and diffuse reflection

| Параметр         | Классификатор, построенный по трем параметрам: $I_{365}$ , $I_{450}$ , $StO_2$ | Классификатор, построенный по двум параметрам: $I_{365}$ , $I_{450}$ | Классификатор, построенный по двум параметрам: $I_{365}$ , $StO_2$ | Классификатор, построенный по двум параметрам: $I_{450}$ , $StO_2$ |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Чувствительность | 0.90                                                                           | 0.75                                                                 | 0.90                                                               | 0.90                                                               |
| Специфичность    | 0.95                                                                           | 0.85                                                                 | 0.90                                                               | 0.95                                                               |

Здесь наиболее эффективным оказался метод случайного леса (Random Forest – RF). В подобной модели используется так называемая bootstrap-агрегация, также известная как bagging, для построения совокупности деревьев решений. Для каждого подмножества обучающих данных строится дерево решений, которое обучается независимо и использует только некоторые случайно выбранные признаки из об-

щего набора признаков. Окончательное решение принимается агрегированием среднего значения решений по всем деревьям. В табл. 4 приведены параметры эффективности разработанных классификаторов при использовании четырех диагностических параметров:  $I$ ,  $\tau_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\tau_2$ .

**Обсуждение.** На первом этапе с целью построения метода дифференциации условно здоровой паренхимы и опухолей печени были

Табл. 4. Параметры эффективности предложенных классификаторов дифференциации условно здоровой паренхимы печени и опухоли на основе данных, полученных с помощью устройства, реализующего метод ФС с временным разрешением

Tab. 4. Efficiency parameters of the proposed classifiers for differentiation of healthy liver parenchyma and tumor based on the data obtained using time-resolved fluorescence spectroscopy

| Параметр         | Первичный рак печени | Метастазы различного происхождения | Доброкачественная опухоль |
|------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Чувствительность | 0.91                 | 0.92                               | 0.84                      |
| Специфичность    | 0.96                 | 0.88                               | 0.97                      |

обнаружены различия в длинах волн, на которых наблюдалось максимальное значение флуоресценции в нормальных и патологических биотканях. Такое наблюдение, скорее всего, обусловлено опухолевыми трансформациями печеночной паренхимы. В норме ткань печени состоит из гепатоцитов, которые обеспечивают метаболические функции органа, в том числе выработку билирубина. При онкологических перестройках эта выделительная функция нарушается и данный пигмент в новообразованиях практически отсутствует. Спектр аутофлуоресценции билирубина сдвинут относительно других основных эндогенных флуорофоров (НАДН, ФАД) в красную область, что, скорее всего, влияет на суммарный регистрируемый спектр флуоресценции печеночной паренхимы. Наблюдаемое увеличение параметра тканевой сатурации в опухолевых тканях по сравнению с условно здоровыми тканями печени можно объяснить тем, что из-за неконтролируемого распространения опухолевых клеток при отсутствии эффективного кровоснабжения возникает гипоксия. В этих условиях увеличивается выработка ангиогенных факторов и начинается активная васкуляризация опухоли. Широко признано, что метастазы и опухоли в печени преимущественно кровоснабжаются артериальной кровью [39]. Кроме того, одно из возможных объяснений заключается в том, что гепатоцеллюлярные карциномы и метастазы из других органов кровоснабжаются печеночными артериями, в то время как паренхима печени имеет двойное кровоснабжение: от 75 до 80 % от общего объема печеночной крови поступает из портальной вены и от 20 до 25 % – из печеночной артерии.

При построении классификаторов для дифференциации паренхимы и опухолей печени самый высокий уровень диагностической эффективности достигается при использовании в качестве диагностических сочетания параметров максимальной амплитуды флуоресценции, возбужденной на длине волны 450 нм, и насыщения тканей кислородом или в случае использования всех трех параметров.

На втором этапе с целью построения метода классификации различного типа опухолей печени было обнаружено, что каждый из типов

новообразования имеет свой так называемый метаболический портрет. В большинстве случаев, если другие метаболические пути не оказывают существенного влияния, наблюдается изменение соотношения относительных вкладов свободной и связанной форм кофермента НАДН из-за изменения баланса между гликолизом и окислительным фосфорилированием [40]. Первичные опухоли печени характеризовались повышенной интенсивностью флуоресценции, уменьшением времени жизни  $\tau_2$  и относительного вклада компоненты с длительным временем  $\alpha_2$ , ассоциированных с формой кофермента НАДН, связанной с белком. Такие перестройки характерны при значительном увеличении вклада гликолиза по сравнению с митохондриальным окислительным фосфорилированием в метаболизме опухоли [38, 40]. Также повышенная интенсивность флуоресценции была зарегистрирована в метастазах, незначительные изменения регистрировались в значениях параметра  $\tau_1$ . Это может быть связано с тем, что метаболизм в метастазах не имеет преобладающего гликолитического пути и вклад во флуоресценцию вносят флуорофоры, ассоциированные с другими метаболическими перестройками. В группе пациентов с доброкачественной опухолью печени статистически значимая разница зарегистрирована для параметров  $\alpha_2$  и  $\tau_2$ , которые тоже были увеличены по сравнению с паренхимой печени. Это может косвенно указывать на метаболические перестройки в указанных типах опухолей, но требует дополнительных исследований.

Задача классификации опухолей по разным группам была более сложной, чем задача дифференциации патологических и опухолевых тканей, но рассчитанные показатели точности диагностики достигли высоких значений для всех видов рака. При этом обнаружение первичного рака печени, с наиболее выраженными и однозначными сдвигами тканевого метаболизма, имеет наибольшую чувствительность и специфичность в классификации типов опухолей.

Таким образом, разработаны 2 метода для дифференциации нормальных и патологических тканей печени при проведении ЧПБ, а также метод получения предварительного диагноза о типе опухолей. Безусловное преимуще-

ство первого метода – относительная дешевизна исполнения его аппаратной части. При реализации в программно-аппаратных комплексах метод легко масштабировать в серийное производство с целью внедрения в рутинную клиническую практику врачей-онкологов для повышения диагностической эффективности пункционных биопсий. По стоимостным характеристикам технических средств второй метод, безусловно, более затратен, однако получаемая информация о типе опухоли является ценной и приближается к диагностической эффективности гистопатологических методов диагностики.

**Заключение.** Несмотря на достижения в совершенствовании методов визуализационной диагностики (КТ, МРТ, ангиография), у некоторых пациентов диагноз рака печени не может быть подтвержден методами визуализации, и в этих случаях необходимо пункционное малоинвазивное вмешательство. Несмотря на рутинность и относительную безопасность таких процедур, все еще сохраняются проблемы интраоперационной навигации пункционных игл, а также отсутствия возможности получать хотя бы предварительное заключение о типе тканей

с подозрением на онкологические. Оптические технологии уже несколько последних десятилетий доказывают свою перспективность для получения диагностической информации о функциональном состоянии биологических тканей.

Разработанные методы дифференциации паренхимы печени и новообразований, а также классификации типов опухолей печени на основе методов ФС, СДО и ФС с временным разрешением могут применяться на этапе малоинвазивного пункционного вмешательства. Использование предложенных методов позволит не только решить важную проблему выбора места взятия биопсии при проведении ЧПБ печени, но и сразу предварительно определить диагноз природы опухоли (доброкачественная или злокачественная), а также ее происхождение (первичная опухоль или метастазы). Это позволит сделать диагностику при минимально инвазивных хирургических процедурах быстрее, увеличит ее точность и надежность, что имеет первостепенное значение при определении стратегии лечения в каждом клиническом случае и играет решающую роль в переходе к персонализированной медицине.

### Список литературы

1. Cancer statistics / R. L. Siegel, K. D. Miller, H. E. Fuchs, A. Jemal // *CA: a cancer j. for clinicians*. 2022. Vol. 72, № 1. P. 7–33. doi: 10.3322/caac.21708
2. Attwa M. H., El-Etreby S. A. Guide for diagnosis and treatment of hepatocellular carcinoma // *World j. of hepatology*. 2015. Vol. 7, № 12. P. 1632–1651. doi: 10.4254/wjh.v7.i12.1632
3. Imaging Diagnosis of Hepatocellular Carcinoma: A State-of-the-Art Review / G. Candita, S. Rossi, K. Cwiklinska, S. C. Fanni, D. Cioni, R. Lencioni, E. Neri // *Diagnostics*. 2023. Vol. 13, № 4. P. 625. doi: 10.3390/diagnostics13040625
4. Imaging for the diagnosis of hepatocellular carcinoma: A systematic review and meta-analysis / L. R. Roberts, C. B. Sirlin, F. Zaiem, J. Almasri, L. J. Prokop, J. K. Heimbach, M. H. Murad, K. Mohammed // *Hepatology*. 2018. Vol. 67, № 1. P. 401–421. doi: 10.1002/hep.29487
5. When and how should we perform a biopsy for HCC in patients with liver cirrhosis in 2018? A review / F. P. Russo, A. Imondi, E. N. Lynch, F. Farinati // *Digestive and liver disease: official j. of the Italian Society of Gastroenterology and the Italian Association for the Study of the Liver*. 2018. Vol. 50, № 7. P. 640–646. doi: 10.1016/j.dld.2018.03.014
6. Biopsy of focal liver lesions: guidelines, comparison of techniques and cost-analysis / S. M. Francque,

- F. F. De Pauw, G. H. Van den Steen, E. A. Van Marck, P. A. Pelckmans, P. P. Michiels // *Acta gastroenterologica Belgica*. 2003. Vol. 66, № 2. P. 160–165.
7. Factors affecting inadequate sampling of ultrasound-guided fine-needle aspiration biopsy of thyroid nodules / S. H. Choi, K. H. Han, J. H. Yoon, H. J. Moon, E. J. Son, J. H. Youk, E. K. Kim, J. Y. Kwak // *Clinical endocrinology*. 2011. Vol. 74, № 6. P. 776–782. doi: 10.1111/j.1365-2265.2011.04011.x
8. Inadequate fine needle aspiration biopsy samples: pathologists versus other specialists // G. S. Gomez-Macias, R. Garza-Guajardo, J. Segura-Luna, O. Barboza-Quintana // *CytoJournal*. 2009. Vol. 6. Art. № 4. doi: 10.4103/1742-6413.52831
9. The management of hepatocellular carcinoma / M. Ducreux, G. K. Abou-Alfa, T. Bekaii-Saab, J. Berlin, A. Cervantes, T. de Baere, C. Eng, P. Galle, S. Gill, T. Gruenberger, K. Haustermans, A. Lamarca, P. Laurent-Puig, J. M. Llovet, F. Lordick, T. Macarulla, D. Mukherji, K. Muro, R. Obermannova, J. M. O'Connor, E. M. O'Reilly, P. Osterlund, P. Philip, G. Prager, E. Ruiz-Garcia, B. Sangro, T. Seufferlein, J. Tabernero, C. Verslype, H. Wasan, E. Van Cutsem // *Current expert opinion and recommendations derived from the 24<sup>th</sup> ESMO/World Congress on Gastrointestinal Cancer, Barcelona, 2022. ESMO open*, 2023, vol. 8, № 3, p. 101567. doi: 10.1016/j.esmoop.2023.101567

10. Treatment of Primary Liver Tumors and Liver Metastases, Part 1: Nuclear Medicine Techniques / N. Voutsinas, S. Lekperic, S. Barazani, J. J. Titano, S. I. Heiba, E. Kim // J. of nuclear medicine: official publication, Society of Nuclear Medicine. 2018. Vol. 59, № 11. P. 1649–1654. doi: 10.2967/jnumed.116.186346

11. Дунаев А. В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека. Старый Оскол: ТНТ, 2022. 440 с.

12. Дунаев А. В. Метод и устройство оценки функционального состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека на основе мультипараметрической оптической диагностики // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 77–91. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-77-91

13. Croce A. C., Bottiroli G. Autofluorescence spectroscopy and imaging: a tool for biomedical research and diagnosis // European j. of histochemistry: EJH. 2014. Vol. 58, № 4. P. 2461. doi: 10.4081/ejh.2014.2461

14. Флуоресцентная диагностика митохондриальной функции в эпителиальных тканях in vivo / Е. А. Жеребцов, В. В. Дремин, А. И. Жеребцова, Е. В. Потапова, А. В. Дунаев; Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева. Орел, 2018. 107 с.

15. Метод оценки местного метаболизма опухолей молочных желез на основе мультимодальной оптической технологии / М. И. Арабачян, В. В. Шуплецов, М. Ю. Кириллин, А. В. Дунаев, Е. В. Потапова // Онкологический журн.: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2024. Т. 7, № 2. С. 37–45. doi: 10.37174/2587-7593-2024-7-2-37-45

16. Interrogation of tumor metabolism in tissue samples ex vivo using fluorescence lifetime imaging of NAD(P)H / M. M. Lukina, L. E. Shimolina, N. M. Kiselev, V. E. Zagaynov, D. V. Komarov, E. V. Zagaynova, M. V. Shirmanova // Methods and applications in fluorescence. 2019. Vol. 8, № 1. P. 14002. doi: 10.1088/2050-6120/ab4ed8

17. Metabolic cofactors NAD(P)H and FAD as potential indicators of cancer cell response to chemotherapy with paclitaxel / M. M. Lukina, V. V. Dudenkova, N. I. Ignatova, I. N. Druzhkova, L. E. Shimolina, E. V. Zagaynova, M. V. Shirmanova // Biochimica et biophysica acta. General subjects. 2018. Vol. 1862, № 8. P. 1693–1700. doi: 10.1016/j.bbagen.2018.04.021

18. Sensitive detection of intracellular environment of normal and cancer cells by autofluorescence lifetime imaging / K. Awasthi, D. Moriya, T. Nakabayashi, L. Li, N. Ohta // J. of photochemistry and photobiology. B, Biology. 2016. Vol. 165. P. 256–265. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2016.10.023

19. Detection of urinary bladder cancer cells using redox ratio and double excitation wavelengths autofluorescence / S. Palmer, K. Litvinova, E. U. Rafailov, G. Nabi // Biomedical optics express. 2015. Vol. 6, № 3. P. 977–986. doi: 10.1364/BOE.6.000977

20. Fiber-Optic System for Intraoperative Study of Abdominal Organs during Minimally Invasive Surgical Interventions / K. Kandurova, V. Dremine, E. Zherebtsov, E. Potapova, A. Alyanov, A. Mamoshin,

Y. Ivanov, A. Borsukov, A. Dunaev // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, № 2. P. 217. doi: 10.3390/app9020217

21. Metabolic mapping of MCF10A human breast cells via multiphoton fluorescence lifetime imaging of the coenzyme NADH / D. K. Bird, L. Yan, K. M. Vrotsos, K. W. Eliceiri, E. M. Vaughan, P. J. Keely, J. G. White, N. Ramanujam // Cancer research. 2005. Vol. 65, № 19. P. 8766–8773. doi: 10.1158/0008-5472.CAN-04-3922

22. Suhling K., French P. M. W., Phillips D. Time-resolved fluorescence microscopy // Photochemical & Photobiological Sciences. 2005. Vol. 4, № 1. P. 13–22. doi: 10.1039/b412924p

23. Real time optical Biopsy: Time-resolved Fluorescence Spectroscopy instrumentation and validation / D. S. Kittle, F. Vasefi, C. G. Patil, A. Mamelak, K. L. Black, P. V. Butte // Scientific reports. 2016. Vol. 6. P. 38190. doi: 10.1038/srep38190

24. Preclinical ex vivo evaluation of the diagnostic performance of a new device for in situ label-free fluorescence spectral analysis of breast masses / M. C. Mathieu, A. Toullec, C. Benoit, R. Berry, P. Validire, P. Beaumel, Y. Vincent, P. Maroun, P. Vielh, L. Alchab, R. Farcy, H. Moniz-Koum, M. P. Fontaine-Aupart, S. Delalogue, C. Balleyguier // European radiology. 2018. Vol. 28, № 6. P. 2507–2515. doi: 10.1007/s00330-017-5228-7

25. Towards the use of diffuse reflectance spectroscopy for real-time in vivo detection of breast cancer during surgery / L. L. de Boer, T. M. Bydlon, F. van Duijnhoven, M. T. F. D. Vranken Peeters, C. E. Loo, G. A. O. Winter-Warnars, J. Sanders, H. J. C. M. Sterenberg, B. H. W. Hendriks, T. J. M. Ruers // J. of translational medicine. 2018. Vol. 16, № 1. P. 367. doi: 10.1186/s12967-018-1747-5

26. Auto-fluorescence lifetime and light reflectance spectroscopy for breast cancer diagnosis: potential tools for intraoperative margin detection / V. Sharma, S. Shivalingaiah, Y. Peng, D. Euhus, Z. Gryczynski, H. Liu // Biomedical optics express. 2012. Vol. 3, № 8. P. 1825–1840. doi: 10.1364/BOE.3.001825

27. Pulmonary Endogenous Fluorescence Allows the Distinction of Primary Lung Cancer from the Perilesional Lung Parenchyma / L. Gust, A. Toullec, C. Benoit, R. Farcy, S. Garcia, V. Secq, J. Y. Gaubert, D. Trousse, B. Orsini, C. Doddoli, H. Moniz-Koum, P. A. Thomas, X. B. D'journo // PloS One. 2015. Vol. 10, № 8. P. e0134559. doi: 10.1371/journal.pone.0134559

28. A customized multispectral needle probe combined with a virtual photometric setup for in vivo detection of Lewis lung carcinoma in an animal model / F. Braun, R. Schalk, M. Nachtmann, A. Hien, R. Frank, T. Beuermann, F.-J. Methner, B. Kränzlin, M. Rädle, N. Gretz // Measurement Science and Technology. 2019. Vol. 30, № 10. P. 104001. doi: 10.1088/1361-6501/ab24a1

29. Real-time In Vivo Tissue Characterization with Diffuse Reflectance Spectroscopy during Transthoracic Lung Biopsy: A Clinical Feasibility Study / J. W. Spliethoff, W. Prevoo, M. A. Meier, J. de Jong, H. M. Klomp, D. J. Evers, H. J. Sterenberg, G. W. Lucassen, B. H. Hen-

driks, T. J. Ruers // Clinical cancer research: an official j. of the American Association for Cancer Research. 2016. Vol. 22, № 2. P. 357–365. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-15-0807

30. Diffuse reflectance spectroscopy of human liver tumor specimens – towards a tissue differentiating optical biopsy needle using light emitting diodes / A. Keller, P. Bialecki, T. J. Wilhelm, M. K. Vetter // Biomedical optics express. 2018. Vol. 9, № 3. P. 1069–1081. doi: 10.1364/BOE.9.001069

31. Monitoring of tumor response to Cisplatin using optical spectroscopy / J. W. Spliethoff, D. J. Evers, J. E. Jaspers, B. H. Hendriks, S. Rottenberg, T. J. Ruers // Translational oncology. 2014. Vol. 7, № 2. P. 230–239. doi: 10.1016/j.tranon.2014.02.009

32. In vivo characterization of colorectal metastases in human liver using diffuse reflectance spectroscopy: toward guidance in oncological procedures / J. W. Spliethoff, L. L. de Boer, M. A. Meier, W. Prevoo, J. de Jong, K. Kuhlmann, T. M. Bydlon, H. J. Sterenborg, B. H. Hendriks, T. J. Ruers // J. of biomedical optics. 2016. Vol. 21, № 9. P. 097004. doi: 10.1117/1.JBO.21.9.097004

33. In vivo tumor identification of colorectal liver metastases with diffuse reflectance and fluorescence spectroscopy / E. Tanis, D. J. Evers, J. W. Spliethoff, V. V. Pully, K. Kuhlmann, F. van Coevorden, B. H. Hendriks, J. Sanders, W. Prevoo, T. J. Ruers, // Lasers in surgery and medicine. 2016. Vol. 48, № 9. P. 820–827. doi: 10.1002/lsm.22581

34. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks / E. Zherebtsov, V. Dremine, A. Popov, A. Doronin, D. Kurakina, M. Kirillin, I. Meglinski, A. Bykov // Biomedical optics express. 2019. Vol. 10, № 7. P. 3545–3559. doi: 10.1364/BOE.10.003545

35. Optical percutaneous needle biopsy of the liver: a pilot animal and clinical study / V. Dremine, E. Potapova, E. Zherebtsov, K. Kandurova, V. Shupletsov, A. Alekseyev, A. Mamoshin, A. Dunaev // Scientific reports. 2020. Vol. 10, № 1. P. 14200. doi: 10.1038/s41598-020-71089-5

36. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation) // Health physics. 2004. Vol. 87, № 2. P. 171–186. doi: 10.1097/00004032-200408000-00006

37. Fluorescence lifetime needle optical biopsy discriminates hepatocellular carcinoma / E. A. Zherebtsov, E. V. Potapova, A. V. Mamoshin, V. V. Shupletsov, K. Y. Kandurova, V. V. Dremine, A. Y. Abramov, A. V. Dunaev // Biomedical optics express. 2022. Vol. 13, № 2. P. 633–646. doi: 10.1364/BOE.447687

38. Detection of NADH and NADPH levels in vivo identifies shift of glucose metabolism in cancer to energy production / E. V. Potapova, E. A. Zherebtsov, V. V. Shupletsov, V. V. Dremine, K. Y. Kandurova, A. V. Mamoshin, A. Y. Abramov, A. V. Dunaev // The FEBS j. 2024. Vol. 291, № 12. P. 2674–2682. doi: 10.1111/febs.17067

39. Development of arterial blood supply in experimental liver metastases / K. Dezso, E. Bugyik, V. Papp, V. László, B. Döme, J. Tóvári, J. Timár, P. Nagy, S. Paku // The American j. of pathology. 2009. Vol. 175, № 2. P. 835–843. doi: 10.2353/ajpath.2009.090095

40. In vivo multiphoton fluorescence lifetime imaging of protein-bound and free nicotinamide adenine dinucleotide in normal and precancerous epithelia / M. C. Skala, K. M. Riching, D. K. Bird, A. Gendron-Fitzpatrick, J. Eickhoff, K. W. Eliceiri, P. J. Keely, N. Ramanujam // J. of biomedical optics. 2007. Vol. 12, № 2. P. 024014. doi: 10.1117/1.2717503

## Информация об авторе

**Потапова Елена Владимировна** – кандидат технических наук (2008), доцент (2017), доцент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, старший научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники Орловского государственного университета им. И. С. Тургенева. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – биомедицинское приборостроение; биомедицинская фотоника; оптическая диагностика в малоинвазивной хирургии.

Адрес: Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, ул. Комсомольская, д. 95, Орел, 302026, Россия

E-mail: potapova\_ev\_ogu@mail.ru

http://orcid.org/0000-0002-9227-6308

## References

1. Siegel R. L., Miller K. D., Fuchs H. E., Jemal A. Cancer Statistics. CA: a Cancer J. for Clinicians. 2022, vol. 72, no. 1, pp. 7–33. doi: 10.3322/caac.21708

2. Attwa M. H., El-Etreby S. A. Guide for Diagnosis and Treatment of Hepatocellular Carcinoma. World J. of Hepatology. 2015, vol. 7, no. 12, pp. 1632–1651. doi: 10.4254/wjh.v7.i12.1632

3. Candita G., Rossi S., Cwiklinska K., Fanni S. C., Cioni D., Lencioni R., Neri E. Imaging Diagnosis of Hepatocellular Carcinoma: A State-of-the-Art Review. Diagnostics. 2023,

vol. 13, no. 4, p. 625. doi: 10.3390/diagnostics13040625

4. Roberts L. R., Sirlin C. B., Zaiem F., Almasri J., Prokop L. J., Heimbach J. K., Murad M. H., Mohammed K. Imaging for the Diagnosis of Hepatocellular Carcinoma: A Systematic Review and Meta-Analysis. Hepatology. 2018, vol. 67, no. 1, pp. 401–421. doi: 10.1002/hep.29487

5. Russo F. P., Imondi A., Lynch E. N., Farinati F. When and How Should We Perform a Biopsy for HCC in Patients with Liver Cirrhosis in 2018? A Review. Digestive and Liver Disease: Official J. of the Italian Society of Gastroenterology

and the Italian Association for the Study of the Liver. 2018, vol. 50, no. 7, pp. 640–646. doi: 10.1016/j.dld.2018.03.014

6. Francque S. M., De Pauw F. F., Van den Steen G. H., Van Marck E. A., Pelckmans P. A., Michielsen P. P. Biopsy of Focal Liver Lesions: Guidelines, Comparison of Techniques and Cost-Analysis. *Acta Gastro-Enterologica Belgica*. 2003, vol. 66, no. 2, pp. 160–165.

7. Choi S. H., Han K. H., Yoon J. H., Moon H. J., Son E. J., Youk J. H., Kim E. K., Kwak J. Y. Factors Affecting Inadequate Sampling of Ultrasound-Guided Fine-Needle Aspiration Biopsy of Thyroid Nodules. *Clinical Endocrinology*. 2011, vol. 74, no. 6, pp. 776–782. doi: 10.1111/j.1365-2265.2011.04011.x

8. Gomez-Macias G. S., Garza-Guajardo R., Segura-Luna J., Barboza-Quintana O. Inadequate Fine Needle Aspiration Biopsy Samples: Pathologists Versus Other Specialists. *CytoJournal*. 2009, vol. 6, art. no. 4. doi: 10.4103/1742-6413.52831

9. Ducreux M., Abou-Alfa G. K., Bekaii-Saab T., Berlin J., Cervantes A., de Baere T., Eng C., Galle P., Gill S., Gruenberger T., Haustermans K., Lamarca A., Laurent-Puig P., Llovet J. M., Lordick F., Macarulla T., Mukherji D., Muro K., Obermannova R., O'Connor J. M., O'Reilly E. M., Osterlund P., Philip P., Prager G., Ruiz-Garcia E., Sangro B., Seufferlein T., Tabernero J., Verslype C., Wasan H., Van Cutsem E. The Management of Hepatocellular Carcinoma. Current Expert Opinion and Recommendations Derived from the 24<sup>th</sup> ESMO/World Congress on Gastrointestinal Cancer, Barcelona, 2022. *ESMO open*, 2023, vol. 8, no. 3, p. 101567. doi: 10.1016/j.esmoop.2023.101567

10. Voutsinas N., Lekperic S., Barazani S., Titano J. J., Heiba S. I., Kim E. Treatment of Primary Liver Tumors and Liver Metastases. Part 1: Nuclear Medicine Techniques. *J. of Nuclear Medicine: Official Publication, Society of Nuclear Medicine*. 2018, vol. 59, no. 11, pp. 1649–1654. doi: 10.2967/jnumed.116.186346

11. Dunaev A. V. *Mul'timodal'naya opticheskaya diagnostika mikrocirkulyatorno-tkaneyh sistem organizma cheloveka: monografiya* [Multimodal Optical Diagnostics of Microcirculatory and Tissue Systems of the Human Body: Monograph]. *Staryj Oskol*, TNT, 2022, 440 p. (In Russ.)

12. Dunaev A. V. Method and a Device for Evaluating the Functional State of Microcirculatory-Tissue Systems of the Human Body Based on Multiparametric Optical Diagnostics. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 77–91. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-77-91 (In Russ.)

13. Croce A. C., Bottiroli G. Autofluorescence Spectroscopy and Imaging: A Tool for Biomedical Research and Diagnosis. *European J. of Histochemistry: EJH*. 2014, vol. 58, no. 4, p. 2461. doi: 10.4081/ejh.2014.2461

14. Zherebtsov E. A., Dremine V. V., Zherebtsova A. I., Potapova E. V., Dunaev A. V. *Fluorescentnaya diagnostika mitohondrial'noj funktsii v epitelial'nyh tkanyah in vivo: monografiya* [Fluorescence Diagnostics of Mitochondrial Function in Epithelial Tissues in Vivo: Monograph]. Orel, Orel State University, 2018, 107 p. (In Russ.)

15. Arabachyan M. I., Shupletsov V. V., Kirillin M. Y., Dunaev A. V., Potapova E. V. Method for Assessing Local Metabolism of Mammary Tumors Based on Multimodal Optical Technology. *J. of Oncology: Diagnostic Radiology*

and Radiotherapy. 2024, vol. 7, no. 2, pp. 37–45. doi: 10.37174/2587-7593-2024-7-2-37-45 (In Russ.)

16. Lukina M. M., Shimolina L. E., Kiselev N. M., Zagaynov V. E., Komarov D. V., Zagaynova E. V., Shirmanova M. V. Interrogation of Tumor Metabolism in Tissue Samples Ex Vivo Using Fluorescence Lifetime Imaging of NAD(P)H. *Methods and Applications in Fluorescence*. 2019, vol. 8, no. 1, p. 14002. doi: 10.1088/2050-6120/ab4ed8

17. Lukina M. M., Dudenkova V. V., Ignatova N. I., Druzhkova I. N., Shimolina L. E., Zagaynova E. V., Shirmanova M. V. Metabolic Cofactors NAD(P)H and FAD as Potential Indicators of Cancer Cell Response to Chemotherapy with Paclitaxel. *Biochimica et Biophysica Acta. General Subjects*. 2018, vol. 1862, no. 8, pp. 1693–1700. doi: 10.1016/j.bbagen.2018.04.021

18. Awasthi K., Moriya D., Nakabayashi T., Li L., Ohta N. Sensitive Detection of Intracellular Environment of Normal and Cancer Cells by Autofluorescence Lifetime Imaging. *J. of Photochemistry and Photobiology. B, Biology*. 2016, vol. 165, pp. 256–265. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2016.10.023

19. Palmer S., Litvinova K., Rafailov E. U., Nabi G. Detection of Urinary Bladder Cancer Cells Using Redox Ratio and Double Excitation Wavelengths Autofluorescence. *Biomedical Optics Express*. 2015, vol. 6, no. 3, pp. 977–986. doi: 10.1364/BOE.6.000977

20. Kandurova K., Dremine V., Zherebtsov E., Potapova E., Alyanov A., Mamoshin A., Ivanov Y., Borsukov A., Dunaev A. Fiber-Optic System for Intraoperative Study of Abdominal Organs during Minimally Invasive Surgical Interventions. *Applied Sciences*. 2019, vol. 9, no. 2, p. 217. doi: 10.3390/app9020217

21. Bird D. K., Yan L., Vrotsos K. M., Eliceiri K. W., Vaughan E. M., Keely P. J., White J. G., Ramanujam N. Metabolic Mapping of MCF10A Human Breast Cells Via Multiphoton Fluorescence Lifetime Imaging of the Coenzyme NADH. *Cancer Research*. 2005, vol. 65, no. 19, pp. 8766–8773. doi: 10.1158/0008-5472.CAN-04-3922

22. Suhling K., French P. M. W., Phillips D. Time-Resolved Fluorescence Microscopy. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2005, vol. 4, no. 1, pp. 13–22. doi: 10.1039/b412924p

23. Kittle D. S., Vasefi F., Patil C. G., Mamelak A., Black K. L., Butte, P. V. Real Time Optical Biopsy: Time-Resolved Fluorescence Spectroscopy Instrumentation and Validation. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, p. 38190. doi: 10.1038/srep38190

24. Mathieu M. C., Toullec A., Benoit C., Berry R., Validire P., Beaumel P., Vincent Y., Maroun P., Vielh P., Alchab L., Farcy R., Moniz-Koum H., Fontaine-Aupart M. P., Delalogue S., Balleyguier C. Preclinical Ex Vivo Evaluation of the Diagnostic Performance of a New Device for in Situ Label-Free Fluorescence Spectral Analysis of Breast Masses. *European Radiology*. 2018, vol. 28, no. 6, pp. 2507–2515. doi: 10.1007/s00330-017-5228-7

25. De Boer L. L., Bydlon T. M., van Duijnhoven F., Vranken Peeters M. T. F. D., Loo C. E., Winter-Warnars G. A. O., Sanders J., Sterenborg H. J. C. M., Hendriks B. H. W., Ruers T. J. M. Towards the Use of Diffuse Reflectance Spectroscopy for Real-Time in

Vivo Detection of Breast Cancer During Surgery. *J. of Translational Medicine*. 2018, vol. 16, no. 1, p. 367. doi: 10.1186/s12967-018-1747-5

26. Sharma V., Shivalingaiah S., Peng Y., Euhus D., Gryczynski Z., Liu H. Auto-Fluorescence Lifetime and Light Reflectance Spectroscopy for Breast Cancer Diagnosis: Potential Tools for Intraoperative Margin Detection. *Biomedical Optics Express*. 2012, vol. 3, no. 8, pp. 1825–1840. doi: 10.1364/BOE.3.001825

27. Gust L., Toullec A., Benoit C., Farcy R., Garcia S., Secq V., Gaubert J. Y., Trousse D., Orsini B., Doddoli C., Moniz-Koum H., Thomas P. A., D'journo X. B. Pulmonary Endogenous Fluorescence Allows the Distinction of Primary Lung Cancer from the Perilesional Lung Parenchyma. *PloS one*. 2015, vol. 10, no. 8, p. e0134559. doi: 10.1371/journal.pone.0134559

28. Braun F., Schalk R., Nachtmann M., Hien A., Frank R., Beuermann T., Methner F.-J., Kränzlin B., Rädle M., Gretz N. A Customized Multispectral Needle Probe Combined with a Virtual Photometric Setup for in Vivo Detection of Lewis Lung Carcinoma in an Animal Model. *Measurement Science and Technology*. 2019, vol. 30, no. 10, p. 104001. doi: 10.1088/1361-6501/ab24a1

29. Spliethoff J. W., Prevoo W., Meier M. A., de Jong J., Klomp H. M., Evers D. J., Sterenborg H. J., Lucassen G. W., Hendriks B. H., Ruers T. J. Real-Time In Vivo Tissue Characterization with Diffuse Reflectance Spectroscopy during Transthoracic Lung Biopsy: A Clinical Feasibility Study. *Clinical Cancer Research: an Official J. of the American Association for Cancer Research*. 2016, vol. 22, no. 2, pp. 357–365. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-15-0807

30. Keller A., Bialecki P., Wilhelm T. J., Vetter M. K. Diffuse Reflectance Spectroscopy of Human Liver Tumor Specimens – Towards a Tissue Differentiating Optical Biopsy Needle Using Light Emitting Diodes. *Biomedical Optics Express*. 2018, vol. 9, no. 3, pp. 1069–1081. doi: 10.1364/BOE.9.001069

31. Spliethoff J. W., Evers D. J., Jaspers J. E., Hendriks B. H., Rottenberg S., Ruers T. J. Monitoring of Tumor Response to Cisplatin Using Optical Spectroscopy. *Translational Oncology*. 2014, vol. 7, no. 2, pp. 230–239. doi: 10.1016/j.tranon.2014.02.009

32. Spliethoff J. W., de Boer L. L., Meier M. A., Prevoo W., de Jong J., Kuhlmann K., Bydlon T. M., Sterenborg H. J., Hendriks B. H., Ruers T. J. In Vivo Characterization of Colorectal Metastases in Human Liver Using Diffuse Reflectance Spectroscopy: Toward Guidance in Oncological Procedures. *J. of Biomedical Optics*. 2016, vol. 21, no. 9, p. 097004. doi: 10.1117/1.JBO.21.9.097004

33. Tanis E., Evers D. J., Spliethoff J. W., Pully V. V., Kuhlmann K., van Coevorden F., Hendriks B. H., Sanders J., Prevoo W., Ruers, T. J. In Vivo Tumor Identification of Colorectal Liver Metastases with Diffuse Reflectance and Fluorescence Spectroscopy. *Lasers in Surgery and Medicine*. 2016, vol. 48, no. 9, pp. 820–827. doi: 10.1002/lsm.22581

34. Zhrebtsov E., Dremine V., Popov A., Doronin A., Kurakina D., Kirillin M., Meglinski I., Bykov A. Hyperspectral Imaging of Human Skin Aided by Artificial Neural Networks. *Biomedical Optics Express*. 2019, vol. 10, no. 7, pp. 3545–3559. doi: 10.1364/BOE.10.003545

35. Dremine V., Potapova E., Zhrebtsov E., Kandurova K., Shupletsov V., Alekseyev A., Mamoshin A., Dunaev A. Optical Percutaneous Needle Biopsy of the Liver: a Pilot Animal and Clinical Study. *Scientific Reports*. 2020, vol. 10, no. 1, p. 14200. doi: 10.1038/s41598-020-71089-5

36. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation). *Health Physics*. 2004, vol. 87, no. 2, pp. 171–186. doi: 10.1097/00004032-200408000-00006

37. Zhrebtsov E. A., Potapova E. V., Mamoshin A. V., Shupletsov V. V., Kandurova K. Y., Dremine V. V., Abramov A. Y., Dunaev A. V. Fluorescence Lifetime Needle Optical Biopsy Discriminates Hepatocellular Carcinoma. *Biomedical Optics Express*. 2022, vol. 13, no. 2, pp. 633–646. doi: 10.1364/BOE.447687

38. Potapova E. V., Zhrebtsov E. A., Shupletsov V. V., Dremine V. V., Kandurova K. Y., Mamoshin A. V., Abramov A. Y., Dunaev A. V. Detection of NADH and NADPH Levels in Vivo Identifies Shift of Glucose Metabolism in Cancer to Energy Production. *The FEBS J*. 2024, vol. 291, no. 12, pp. 2674–2682. doi: 10.1111/febs.17067

39. Dezso K., Bugyik E., Papp V., László V., Döme B., Tóvári J., Tímár J., Nagy P., Paku S. Development of Arterial Blood Supply in Experimental Liver Metastases. *The American J. of Pathology*. 2009, vol. 175, no. 2, pp. 835–843. doi: 10.2353/ajpath.2009.090095

40. Skala M. C., Riching K. M., Bird D. K., Gendron-Fitzpatrick A., Eickhoff J., Eliceiri K. W., Keely P. J., Ramanujam N. In Vivo Multiphoton Fluorescence Lifetime Imaging of Protein-Bound and Free Nicotinamide Adenine Dinucleotide in Normal and Precancerous Epithelia. *J. of Biomedical Optics*. 2007, vol. 12, no. 2, p. 024014. doi: 10.1117/1.2717503

### Information about the authors

**Elena V. Potapova**, Cand. Sci. (2008), Associate Professor (2017), Associate Professor of the Department of Instrumentation, Metrology and Certification, Senior Researcher of Research and Development Center of Biomedical Photonics of Orel State University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: biomedical engineering; biomedical photonics; optical diagnostics in minimally invasive surgery.  
Address: Orel State University, 95, Komsomolskaya St., Orel 302026, Russia  
E-mail: potapova\_ev\_ogu@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-9227-6308>

## Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- распечатку рукописи (1 экз.) – твердую копию файла статьи, подписанную всеми авторами (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц, обзорной статьи не более 20 страниц);
- электронную копию статьи;
- отдельный файл для каждого рисунка и каждой таблицы в формате тех редакторов, в которых они были подготовлены. Размещение рисунка в электронной копии статьи не освобождает от его представления отдельным файлом;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах и их электронную копию (на русском и английском языках) (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.).

### Принимаются к публикации статьи на русском и английском языках.

Рукопись не может быть опубликована, если она не соответствует предъявляемым требованиям и материалам, представляемым с ней.

### Структура научной статьи

Авторам рекомендуется придерживаться следующей структуры статьи:

- Заголовочная часть:
  - УДК (выравнивание по левому краю);
  - название статьи;
  - авторы (перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми), если авторов больше 3, необходимо в конце статьи указать вклад каждого в написание статьи;
  - место работы каждого автора и почтовый адрес организации. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
  - аннотация – 200–250 слов, характеризующих содержание статьи;
  - ключевые слова – 5–7 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится;
  - источник финансирования – указываются источники финансирования (гранты, совместные проекты и т. п.). Не следует использовать сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций;
  - благодарности. В данном разделе выражается признательность коллегам, которые оказывали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес статьи. Прежде чем выразить благодарность, необходимо заручиться согласием тех, кого планируете поблагодарить;
  - конфликт интересов – авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Например, «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Если конфликт интересов возможен, то необходимо пояснение (см. <https://publicationethics.org>).

- Заголовочная часть на английском языке:
  - название (Title);
  - авторы (Authors);
  - место работы каждого автора (Affiliation). Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
  - аннотация (Abstract);
  - ключевые слова (Keywords);
  - источник финансирования (Acknowledgements);
  - конфликт интересов (Conflict of interest).
- Текст статьи.
- Приложения (при наличии).
- Авторский вклад. Если авторов больше 3, необходимо указать вклад каждого в написание статьи.
- Список литературы (библиографический список);
- Информация об авторах.

**Название статьи** должно быть информативным, с использованием основных терминов, характеризующих тему статьи, и четко отражать ее содержание в нескольких словах. Хорошо сформулированное название – гарантия того, что работа привлечет читательский интерес. Следует помнить, что название работы прочтут гораздо больше людей, чем ее основную часть.

**Авторство** и место в перечне авторов определяется договоренностью последних. При примерно равном авторском вкладе рекомендуется алфавитный порядок.

**Аннотация** представляет собой краткое описание содержания изложенного текста. Она должна отражать актуальность, постановку задачи, пути ее решения, фактически полученные результаты и выводы. Содержание аннотации рекомендуется представить в структурированной форме:

**Введение.** Приводится общее описание исследуемой области, явления. Аннотацию не следует начинать словами «Статья посвящена...», «Цель настоящей статьи...», так как вначале надо показать необходимость данного исследования в силу пробела в научном знании, почему и зачем проведено исследование (описать кратко).

**Цель работы.** Постановка цели исследования (цель может быть заменена гипотезой или исследовательскими вопросами).

**Материалы и методы.** Обозначение используемой методологии, методов, процедуры, где, как, когда проведено исследование и пр.

**Результаты.** Основные результаты (приводятся кратко с упором на самые значимые и привлекательные для читателя/научного сообщества).

**Обсуждение (Заключение).** Сопоставление с другими исследованиями, описание вклада исследования в науку.

В аннотации не следует упоминать источники, использованные в работе, пересказывать содержание отдельных разделов.

При написании аннотации необходимо соблюдать особый стиль изложения: избегать длинных и сложных предложений, выражать мысли максимально кратко и четко. Составлять предложения только в настоящем времени и только от третьего лица.

Рекомендуемый объем аннотации – 200–250 слов.

**Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–7, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3.

**Текст статьи** излагается в определенной последовательности. Рекомендуется придерживаться формата IMRAD (Introduction, Methods, Results, Discussion; Введение, Методы, Результаты, Обсуждение):

**Введение.** Во введении автор знакомит с предметом, задачами и состоянием исследований по теме публикации; при этом необходимо обязательно ссылаться на источники, из которых берется информация. Автор приводит описание "белых пятен" в проблеме или того, что еще не сделано, и формулирует цели и задачи исследования.

В тексте могут быть применены сноски, которые нумеруются арабскими цифрами. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники из Интернета, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования).

**Методы.** Необходимо описать теоретические или экспериментальные методы исследования, используемое оборудование и т. д., чтобы можно было оценить и/или воспроизвести исследование. Метод или методологию проведения исследования целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной.

Научная статья должна отображать не только выбранный инструментарий и полученные результаты, но и логику самого исследования или последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические выводы. По результатам экспериментальных исследований целесообразно описать стадии и этапы экспериментов.

**Результаты.** В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. В описании полученных результатов не должно быть никаких пояснений – они даются в разделе «Обсуждение».

**Обсуждение (Заключение и Выводы).** В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования, приводят сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Необходимо показать, что статья решает научную проблему или служит приращению нового знания. Можно объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений. Здесь излагаются предложения по направлению будущих исследований.

**Список литературы** (библиографический список) содержит сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи литературном источнике. В список литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии).

Список литературы должен иметь не менее 15 источников (из них, при наличии, не более 20 % – на собственные работы), имеющих статус научных публикаций.

Приветствуются ссылки на современные англоязычные издания (требования МНБД Scopus – 80 % цитируемых англоязычных источников).

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются. Не допускаются ссылки на учебники, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

**Аннотация на английском языке (Abstract)** в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации

оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов.

**Список литературы (References)** для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5–2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала <https://re.eltech.ru>.

### Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать идентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>. При этом важно, чтобы кабинет автора в ORCID был заполнен информацией об авторе, имел необходимые сведения о его образовании, карьере, другие статьи. Вариант «нет общедоступной информации» при обращении к ORCID не допускается. В сведениях следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

### Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее и нижнее 2.5 см, левое и правое 2.25 см; колонтитулы – верхний 1.5 см, нижний 2.5 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта основного текста 11 pt, остальных сведений 10 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте <https://re.eltech.ru>.

### Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует номенклатуре научных специальностей:

2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь:

- 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.
- 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.
- 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.
- 2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений).
- 2.2.5 – Приборы навигации.
- 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

2.2.7 – Фотоника.

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

2.2.9 – Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.

2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения.

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и нанoeлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", редакция журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"

Технические вопросы можно выяснить по адресу [radioelectronic@yandex.ru](mailto:radioelectronic@yandex.ru)

*Известия высших учебных заведений России.* **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**  
*Journal of the Russian Universities.* **RADIOELECTRONICS**

Том 27 № 6 2024

Vol. 27 No. 6 2024

*Научные редакторы* А. М. Мончак, П. В. Апалина  
*Редакторы* Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек  
*Компьютерная верстка* Е. И. Третьяковой

*Science Editors* A. M. Monchak, P. V. Apalina  
*Editors* E. K. Dolgatov, I. G. Skachek  
*DTP Professional* E. I. Tretyakova

---

Подписано в печать 27.12.24. Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Уч.-изд. л. 16.25. Печ. л. 15.75. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 169.

Цена свободная.

Signed to print 27.12.24. Sheet size 60×84 1/8.

Educational-ed. liter. 16.25. Printed sheets 15.75. Number of copies 300.

Printing plant 1–150 copies. Order no. 169.

Free price.

---

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

ETU Publishing house  
5 F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia