



DOI: 10.32603/1993-8985

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

*Известия высших учебных заведений России*

# **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**

**Том 29 № 2 2026**



*Journal of the Russian Universities*

# **RADIOELECTRONICS**

**Vol. 29 No. 2 2026**

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2026

Saint Petersburg  
ETU Publishing house

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

**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., советник ректората, 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 LANDEKANTA**, 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

**А. Ю. ЕГОРОВ**, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН, ООО «Коннектор

Оптикс», С.-Петербург, Россия

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

университет, Екатеринбург, Россия

**Д. А. КОЗОДАЕВ**, к.ф.-м.н., генеральный директор

NT-MDT BV LLC, Апелдорн, Нидерланды

**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

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.), Rector Adviser, 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

**Anton Yu. EGOROV**, Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, correspondent member RAS, Connector Optics LLC, St Petersburg, Russia

**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

**Dmitry A. KOZODAEV**, PhD, NT-MDT BV LLC (CEO), Apeldoorn, Netherlands

**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. (Phys.-Math.), 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**, PhD, 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

### Обзорные статьи

#### *Микро- и нанoeлектроника*

Белугин М. В., Будаев А. В. Механизмы проводимости полианилина (обзор).....6

### Научные статьи

#### *Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов*

Монаков А. А. Фазовый метод измерения в радиовысотомере с непрерывным частотно-модулированным сигналом.....19

Писарев И. С., Ухов А. А. Селекция полезного сигнала на основе анализа эхолокационной трассы с использованием методов машинного обучения.....30

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

Косак Р. Э., Геворкян А. В. Компактный двухполяризационный сверхширокополосный кардиоидный излучатель с согласующими вставками.....39

#### *Радиолокация и радионавигация*

Машков В. Г., Милях А. Е., Рябев В. И. Метод дистанционного определения состояния плоскостной среды по поляризационным отношениям обратного рассеяния.....49

Боронахин А. М., Нгуен Куок Хань. Определение коэффициента масштабирования в системе интеграции инфракрасной системы и ORB-SLAM.....64

#### *Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника*

Блудов М. В., Трубицын А. А. Разработка магнитной линзы микрофокусной рентгеновской трубки без принудительного жидкостного охлаждения.....79

Шашин Д. Е., Дьячков А. Д., Романов А. Л., Костик Н. Р., Тарасов С. А., Ильин М. Е., Каманина Н. В. Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана, а также их применение в области очистки воды и воздуха.....91

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

Сакун И. А., Попов Д. Б., Скребова Е. М., Самароков М. Д., Тюлькина Т. В., Кравченко В. В., Мулык А. С., Губин А. В. Разработка и апробация методики сбора данных для формирования нормативной базы биомеханических параметров двигательной активности человека.....104

### *От редакции*

#### *Знаменательные даты*

К 75-летию со дня рождения А. А. Потапова.....119

Правила для авторов статей.....122

## CONTENTS

### Review Articles

#### *Micro- and Nanoelectronics*

**Belugin M. V., Budaev A. V.** Conduction Mechanisms in Polyaniline (Review).....6

### Original articles

#### *Radio Electronic Facilities for Signal Transmission, Reception and Processing*

**Monakov A. A.** Phase Estimation Method in a Radio Altimeter  
with a Continuous Frequency Modulated Signal.....19

**Pisarev I. S., Uhov A. A.**  
Useful Signal Discrimination Based on Echolocation Path Analysis Using Machine Learning Methods.....30

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

**Kosak R. E., Gevorkyan A. V.**  
Compact Dual-Polarized Ultra-Wideband Cardioid Radiator with Matching Inserts.....39

#### *Radar and Navigation*

**Mashkov V. G., Milyah A. E., Ryabev V. I.**  
Method for Remote Assessment of Planar Layered Media by Polarization Backscattering Relations.....49

**Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh**  
Determination of the Scale Factor in an Integrated Infrared and ORB-SLAM System.....64

#### *Quantum, Solid-State, Plasma and Vacuum Electronics*

**Bludov M. V., Trubitsyn A. A.**  
Development of a Magnetic Lens for a Microfocus X-Ray Tube without Forced Liquid Cooling.....79

**Shashin D. E., Dyachkov A. D., Romanov A. L., Kostik N. R., Tarasov S. A., Ilyin M. E.,  
Kamanina N. V.** Synthesis, Characterization and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide  
Films for Water and Air Purification.....91

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

**Sakun I. A., Popov D. B., Skrebova E. M., Samarokov M. D.,  
Tyulkina T. V., Kravchenko V. V., Mulyk A. S., Gubin A. V.** Development and Testing  
of a Data Collection Methodology for Compiling a Normative Database of Biomechanical Parameters  
of Human Motor Activity.....104

#### *From the Editor*

#### *Significant Dates*

On the 75th Anniversary of A. A. Potapov's Birth.....119

**Author's Guide**.....122

## Механизмы проводимости полианилина (обзор)

М. В. Белугин<sup>✉</sup>, А. В. Будаев

Курский государственный университет, Курск, Россия

<sup>✉</sup>[maksym.belugin@yandex.ru](mailto:maksym.belugin@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Полианилин (Polyaniline – PANI) демонстрирует уникальное сочетание электрофизических свойств, стабильности и простоты синтеза, что относит его к числу наиболее перспективных проводящих полимеров. Способность к значительному изменению электропроводности в процессе протонирования открывает широкие возможности управления функциональными характеристиками материалов. Несмотря на интенсивные исследования, механизмы переноса заряда в системах на основе PANI остаются недостаточно изученными. Отсутствие единой теоретической модели, описывающей взаимосвязь между химической структурой и электронными свойствами, создает существенные ограничения для целенаправленного создания материалов на основе PANI с заданными параметрами.

**Цель работы.** Систематизация современных представлений о механизмах проводимости PANI с последующей разработкой комплексного подхода, объединяющего поляронную теорию и модели прыжковой проводимости.

**Материалы и методы.** Отбор литературных источников для анализа проводился с использованием хронологического подхода за период более 10 лет, что обусловлено необходимостью ретроспективного анализа формирования современных взглядов на механизм проводимости PANI и расширение областей его применения. Критерием формирования итогового массива источников послужило наличие в них фактических данных, соответствующих тематике исследования.

**Результаты.** Проведенный анализ выявил преобладание поляронного механизма проводимости протонированного PANI и недостаточность существующих теоретических моделей (прыжкового транспорта с переменной длиной прыжка и туннельных механизмов) для полного описания его электронных свойств, что требует разработки комплексного подхода, интегрирующего элементы различных теорий транспорта.

**Заключение.** Анализ современных теоретических подходов к описанию проводимости PANI выявил принципиальные различия в моделях прыжкового транспорта и туннельных механизмов. Отмечается, что ни одна из концепций не обладает достаточной предсказательной силой в отношении пространственного распределения переноса заряда. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости создания синтетической теории, объединяющей методологические преимущества рассмотренных подходов. Разработка такой гибридной модели позволит обеспечить прогресс в проектировании PANI-содержащих материалов с заданными электрофизическими характеристиками.

**Ключевые слова:** PANI, эмеральдин, электропроводность, допирование, модель Мотта, полярон, туннелирование

**Для цитирования:** Белугин М. В., Будаев А. В. Механизмы проводимости полианилина (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 6–18.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-6-18

---

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

Статья поступила в редакцию 15.09.2025; принята к публикации после рецензирования 19.01.2026; опубликована онлайн 30.04.2026

---

## Conduction Mechanisms in Polyaniline (Review)

Maksim V. Belugin<sup>✉</sup>, Artem V. Budaev

Kursk State University, Kursk, Russia

<sup>✉</sup> maksym.belugin@yandex.ru

### Abstract

**Introduction.** Polyaniline (PANI) demonstrates a unique combination of electrophysical properties, stability, and ease of synthesis, making this material one of the most promising conductive polymers. Its ability to significantly alter electrical conductivity during protonation provides broad opportunities for tailoring the functional characteristics of materials. Despite extensive research, the charge transfer mechanisms in PANI-based systems remain insufficiently studied. The lack of a unified theoretical model describing the relationship between chemical structure and electronic properties poses significant limitations for the targeted development of PANI-based materials with specified parameters.

**Aim.** To generalize current knowledge of conduction mechanisms in PANI and to develop a comprehensive approach integrating polaron theory and hopping conductivity models.

**Materials and methods.** The selection of literature sources for review was conducted using a chronological approach covering a period of over 10 years, driven by the need for a retrospective analysis of the evolution of modern views on conduction mechanisms in PANI and the extension of its application areas. The criterion for forming the final set of sources was the presence of factual data relevant to the research topic.

**Results.** The analysis revealed the predominance of the polaron conduction mechanism in protonated PANI and highlighted the inadequacy of existing theoretical models (such as variable-range hopping and tunneling mechanisms) in providing a comprehensive description of its electronic properties. This necessitates the development of a comprehensive approach integrating elements of various transport theories.

**Conclusion.** The analysis of modern theoretical approaches to describing conductivity in PANI revealed fundamental differences between hopping transport and tunneling mechanism models. It is noted that none of the concepts possesses sufficient predictive power regarding the spatial distribution of charge transfer. The obtained results indicate the need to develop a synthetic theory combining the methodological advantages of the considered approaches. The creation of such a hybrid model will facilitate progress in the design of PANI-containing materials with tailored electrophysical characteristics.

**Keywords:** PANI, emeraldine, electrical conductivity, doping, Mott model, polaron, tunneling

**For citation:** Belugin M. V., Budaev A. V. Conduction Mechanisms in Polyaniline (Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 6–18.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-6-18

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

Submitted 15.09.2025; accepted 19.01.2026; published online 30.04.2026

**Введение.** Полианилин (PANI) является одним из представителей класса электропроводящих полимеров. При этом электропроводящие свойства у PANI были обнаружены более чем через столетие после его открытия (первые были упомянуты в публикации в 1862 г.) [1]. PANI является одним из наиболее распространенных и перспективных проводящих полимеров ввиду сравнительно простой методики синтеза, коммерческой доступности и высокой химической устойчивости. Благодаря этому PANI нашел практическое применение в различных сферах: электрохромные компаунды,

конденсаторы высокой емкости, топливные и энергосберегающие элементы и т. д. [2].

Так, например, для PANI и его производных характерен электрохромизм – изменение окраски при переходе из одной формы в другую в ходе обратимых окислительно-восстановительных реакций. Более подробно электрохромные свойства PANI будут рассмотрены далее. Здесь же отметим, что данный полимер под действием электрического поля способен обратимо изменять цвет. Благодаря такой особенности PANI и его производные используются в качестве материала при изготов-

лении так называемых "умных" стекол [3–5].

Также PANI, благодаря тому, что может обладать структурой с различной морфологией, используется при создании сенсоров определенного назначения. В частности, существуют модели газовых сенсоров на основе PANI [6], используемые для идентификации аммиака, гидразина, соляной кислоты, хлороформа, спиртов и т. д. Механизм, лежащий в основе функционирования подобных устройств, включает такие процессы, как допирование макромолекулы идентифицируемым газом, последующее дедопирование, восстановление макромолекулы, набухание и изменение структуры нановолокон PANI [6, 7]. В присутствии газов в PANI активируются как окислительно-восстановительные механизмы, так и механизмы протонирования/депротонирования, что позволяет использовать этот материал в качестве газового датчика. Также благодаря своей высокой биосовместимости и экологической стабильности PANI и его производные нашли применение в качестве биосенсоров [8].

Кроме того, PANI активно используется в качестве основы для композиционных материалов, на базе которых изготавливаются электроды суперконденсаторов – устройств для хранения энергии, которые отличаются от стандартных конденсаторов более высокой плотностью энергии и мощности, длительным сроком эксплуатации. Композиты на основе PANI и его производных отличаются высокой удельной емкостью материала, по значению удельной энергии они превосходят коммерческие аналоги; соответствующие устройства характеризуются стабильностью при перезарядке (до 1000 циклов) [2, 4, 9, 10]. Существенным преимуществом данных композиционных материалов является то, что они могут подвергаться повторной переработке (как следствие, большая экономичность и экологичность в сравнении с аналогами) [2].

В то же время необходимо отметить, что перенос зарядов в проводящих полимерах к настоящему моменту недостаточно изучен [11]. Недопонимание механизма проводимости PANI создает фундаментальное препятствие для предсказательного материаловедения. Без четкой модели, связывающей химическую структуру,

морфологию и температурную зависимость проводимости ( $\sigma(T)$ ), невозможно рационально проектировать материалы, а поиск оптимальных свойств сводится к методу проб и ошибок.

#### Описание механизма допирования PANI.

PANI содержит в своей структуре в качестве мономерных звеньев чередующиеся восстановленные (бензоидные) и окисленные (хиноидные) молекулы N-фенилен-*n*-фенилендиамин. PANI существует в нескольких формах. Так, для основного PANI известен ряд форм: полностью восстановленный лейкомеральдин, образованный только восстановленными молекулами N-фенилен-*n*-фенилендиамин ( $x = 1$ , где  $x$  – доля бензоидных молекул N-фенилен-*n*-фенилендиамин в макромолекуле PANI); полностью окисленный пернигранилин ( $x = 0$ ); эмеральдин ( $x = 0.5$ ), представляющий собой промежуточную форму по отношению к пернигранилину и лейкоэмеральдину – примерно равное содержание окисленных и восстановленных фрагментов [12]. Также был обнаружен нигранилин, который получают частичным окислением эмеральдина ( $x = 0.25$ ). Схема взаимных переходов между различными формами PANI приведена на рис. 1.

Отметим, что каждая форма основного PANI и соответствующие им соли имеют определенный цвет. Так, для эмеральдина характерна синяя окраска в основном состоянии и зеленый цвет в форме соли. Лейкоэмеральдин – бесцветное вещество. Пернигранилин в форме основания и соли имеет фиолетовую и синюю окраску соответственно [13]. Благодаря этому PANI нашел применение при изготовлении электрохромных устройств.

Следует отметить, что электропроводность основных форм PANI лежит в области  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  См/см. Для перевода в высокопроводящее состояние – в форму соли PANI допируют, обрабатывая кислотами в водной среде (чаще всего серной, соляной, хлорной). Разница в электропроводности между основной формой и солью для эмеральдина составляет 9–10 порядков: электропроводность эмеральдиновой соли  $\sim 1$  См/см [14]. Механизм процесса протонирования, сопровождающегося переходом основного эмеральдина в форму соли, включает следующие стадии (рис. 2):

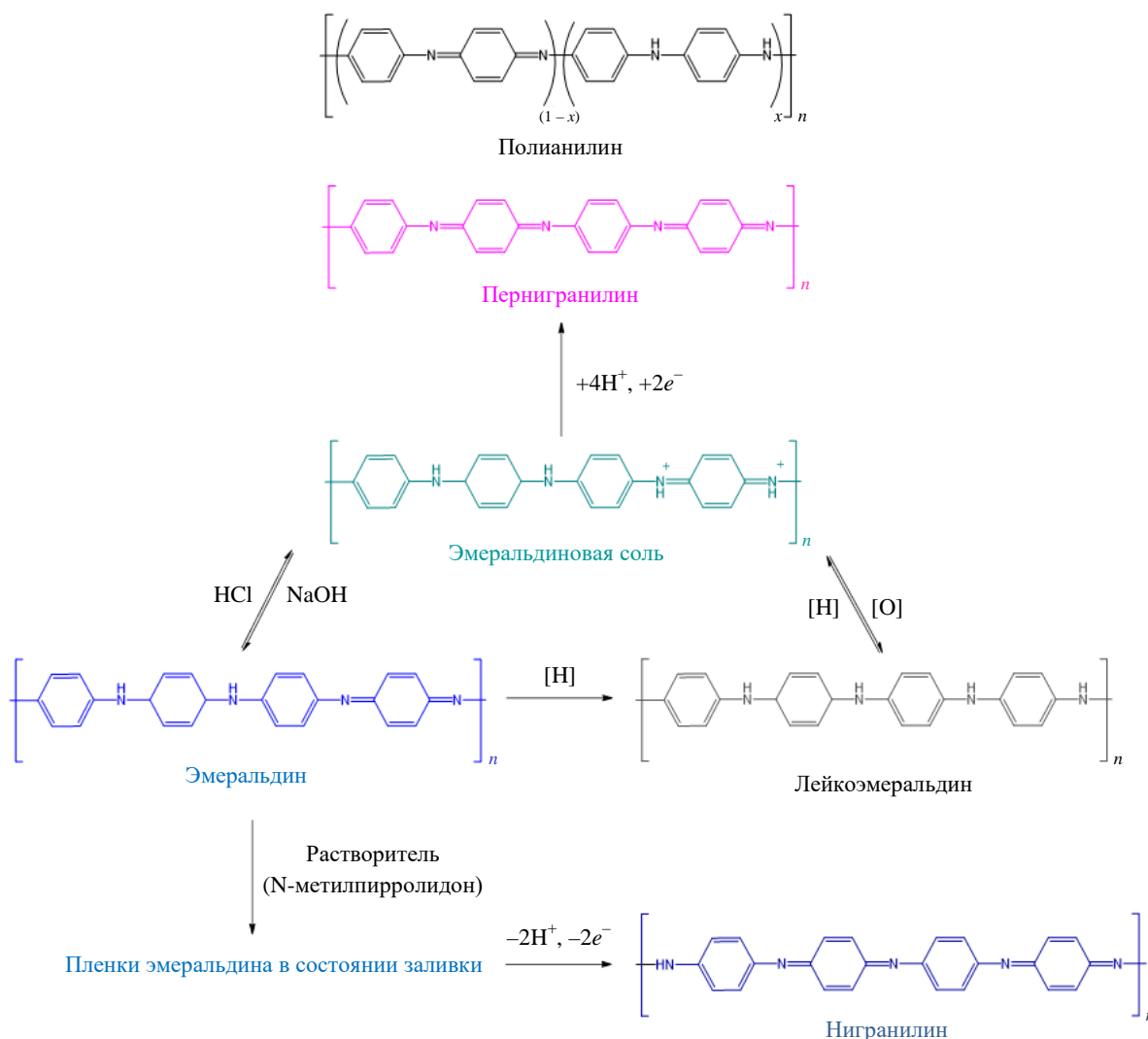


Рис. 1. Схема взаимных переходов между различными формами PANI  
 Fig. 1. Scheme of mutual transitions between different forms of PANI

вначале происходит образование протонированного иминоквинона за счет протонирования иминового азота (проявляющего большую основность по сравнению с аминным азотом). Протонированный иминоквинон представляет собой бесспиновую систему, не содержащую неспаренных электронов, в рамках поляронной теории проводимости соответствующий биполярону. Данная система стабилизирована соответствующими резонансными структурами и, в меньшей степени, противоионами кислоты – допанта. Далее биполярон диспропорционирует с образованием полисемихиноидных катион-радикалов [15]. Последующая стабилизация структуры связана со стремлением к минимализации кулоновского отталкивания и делокализации электро-

нов, что приводит к образованию разделенного катион-радикала или (в рамках поляронной теории) разделенного полярона. Поляроны и биполяроны находятся в динамическом равновесии друг с другом с преимущественным содержанием в системе поляронов [12].

Влияние допирования под действием растворов соляной кислоты различной концентрации на рост электропроводности PANI наглядно продемонстрировано в [16] (рис. 3). Стоит отметить, концентрация соляной кислоты влияет на степень допирования макромолекулы PANI и, как следствие, на электропроводность, обусловленную переходом основной формы эмеральдина в биполяронную и поляронную формы. Подобный характер зависимости проводимости от степени допирования также под-

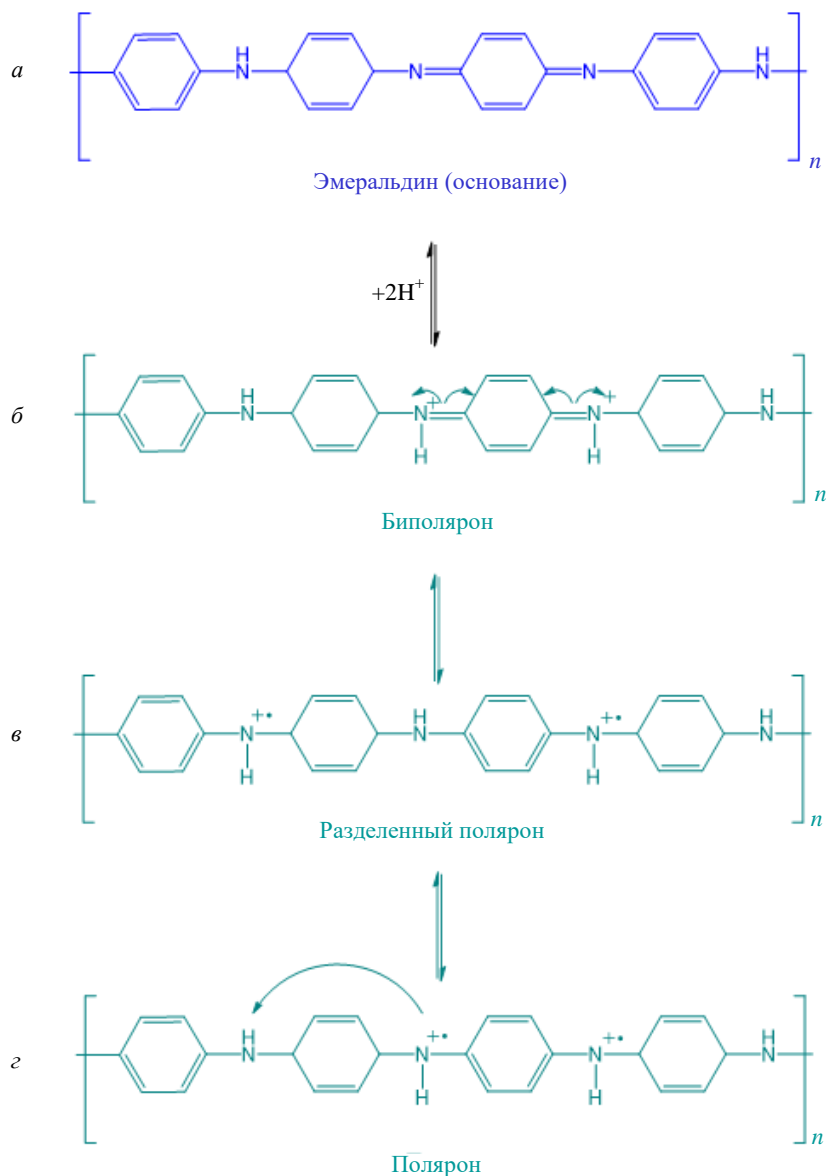


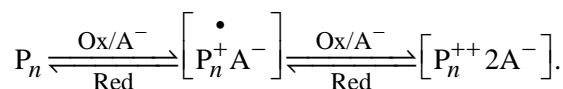
Рис. 2. Схема протонирования эмеральдинового основания (а), включающая образование соли PANI в форме биполарона (б), разделенного полярона (е) и полярона (z)

Fig. 2. Scheme of protonation of the emeraldine base (a), including the formation of a PANI salt in the form of a bipolaron (b), a separated polaron (e) and a polaron (z)

тверждает гипотезу, согласно которой в ходе протонирования происходит пространственное разделение непротонированных и протонированных доменов в макромолекуле.

**Допирование PANI с точки зрения поляронной и зонной теории.** При описании протонирования эмеральдинового основания была упомянута поляронная теория. Механизм переноса зарядов проводящих полимеров (к которым относится в том числе и PANI) с точки зрения поляронной теории описан в [17]. Согласно данной теории проводимость полимера обусловлена образованием поляронов и биполяронов, которые

поляризуют макромолекулы и благодаря собственной мобильности обеспечивают перенос заряда по всей длине макромолекулы. Механизм образования поляронов и биполяронов включает ряд стадий. Вначале в ходе окислительно-восстановительных реакций с участием фрагмента цепи полимера  $P_n$  и, например, вещества-допанта  $H^+A^-$  происходит образование соответствующего катион-радикала и далее возможно окисление до бикацион-радикала:



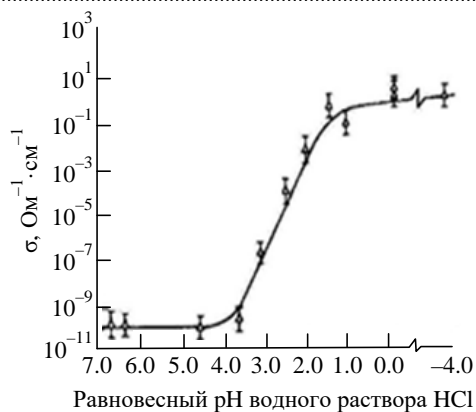
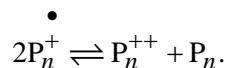


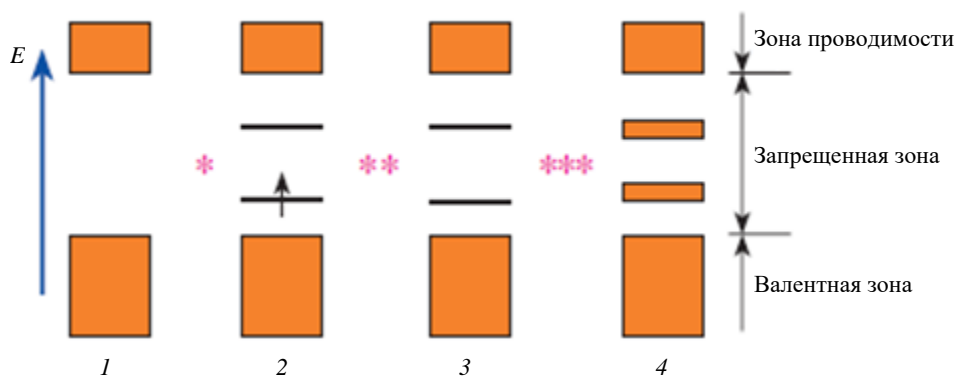
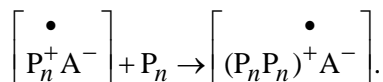
Рис. 3. Зависимость проводимости эмеральдина от pH среды [16]

Fig. 3. Dependence of emeraldine conductivity on the pH of the medium [16]

Катион-радикалы могут вступать в реакции диспропорционирования друг с другом с образованием бикатионов:



Однако катион- и бикатион-радикалы также способны образовывать комплексы переноса заряда с фрагментами макромолекул полимера, не вступившими в описанные ранее реакции ("исходные", непрореагировавшие фрагменты):



- 1 – исходный полимер
- 2 – низкий уровень окисления полимера
- 3, 4 – высокий уровень окисления полимера
- \* – уровни энергии поляронов
- \*\* – уровни энергии биполяронов
- \*\*\* – биполярные зоны

Рис. 4. Схема возникновения уровней энергии поляронов и энергетических зон биполяронов проводящих полимеров [17]

Fig. 4. Scheme describing the emergence of polaron energy levels and energy bands of bipolarons in conductive polymers [17]

В результате данных процессов образуется частично делокализованный катион-радикал, собственно и обуславливающий поляризацию как отдельного фрагмента макромолекулы, так и макромолекулы в целом, именуемый поляроном. Образовавшийся поляронный фрагмент может подвергнуться дальнейшему окислению, что сопровождается формированием биполярона. Появление в составе макромолекулы поляронных и биполяронных фрагментов обуславливает изменение структуры самой макромолекулы и ее зонной структуры. Происходит последовательное формирование сначала уровней энергии поляронов, затем в ходе дальнейшего окисления соответствующих фрагментов уровня биполяронов. Данные энергетические уровни лежат чуть выше валентной зоны (рис. 4). По мере увеличения доли поляронных и биполяронных фрагментов в макромолекуле в результате перекрывания одиночных энергетических уровней образуются полноценные поляронные и биполяронные зоны. Совокупность данных процессов является причиной значительного увеличения проводимости полимера.

Отметим, что в отличие от представленного механизма образования поляронов и биполяронов для PANI (как было упомянуто при описании механизма допирования) переходу к поляронной форме (в сторону которой смещено ди-

намические равновесие) предшествует образованию биполярона.

Повышение электропроводности при протонном допировании PANI обусловлено появлением носителей зарядов и неспаренных электронов в соответствии с представленной ранее схемой и, как следствие, возникновением зарядового и спинового транспорта за счет внутри- и межмолекулярного переноса данных зарядов и неспаренных электронов. Зарядовый транспорт связан в первую очередь с переносом формирующихся при допировании "дырок". В то же время проводимость, обусловленная внутри- и межмолекулярным транспортом протонных, образующихся при диссоциации добавляемой кислоты и ассоциирующихся с положительными зарядами на всем протяжении полиарона, на 2–3 порядка меньше дырочной проводимости и достигает  $10^{-2}$  См/см. С другой стороны, для проводящих полимеров объем макромолекулы в присутствии протонных ионов может вырасти до 30 % [18]. На электропроводность PANI также сильно влияет его морфология. Его электропроводящие свойства обусловлены наличием системы полисопряженных связей и "зигзагообразным" расположением цепи PANI в одной плоскости, из-за которого возможно перекрывание облаков  $\pi$ -электронов ароматических групп и неподеленной пары электронов азота над и под плоскостью цепи [19].

Как было отмечено, с точки зрения поляронной теории проводимости, переход из низкопроводящего в высокопроводящее состояние связан с тем, что при допировании PANI в области запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости (ширина запрещенной зоны для эмеральдина составляет  $\sim 3.5 \dots 4$  эВ) формируются дополнительные энергетические уровни [20]. Это сопровождается повышением уровня Ферми. По мере увеличения числа поляронов и биполяронов происходит локализация энергетических уровней, их перекрывание, формирование узких поляронных и биполяронных зон в запрещенной зоне и, как следствие, уменьшение ширины запрещенной зоны для эмеральдиновых солей до  $1.5 \dots 1.6$  эВ [21–25].

Влияние допирования на проводимость PANI с точки зрения зонной теории рассмотре-

но в [21]. Для основной формы PANI ширина запрещенной зоны, соответствующая оптическому переходу между  $\pi$ -уровнем (валентная зона) и  $\pi^*$ -уровнем (зона проводимости), равна 3.44 эВ (рис. 5, а). Допирование PANI (например, соляной, трихлоруксусной или камфорсульфоновой кислотой) приводит к формированию поляронного уровня, расположенного на расстоянии 1.59 и 2.82 эВ относительно  $\pi$ - и  $\pi^*$ -уровней соответственно (рис. 5, б). Появление новых оптических переходов:  $\pi$ -уровень–поляронный уровень и поляронный уровень– $\pi^*$ -уровень, с меньшим расстоянием по сравнению с исходным переходом  $\pi$ – $\pi^*$ , обеспечивает повышение проводимости PANI [21].

Дальнейший рост проводимости PANI может быть достигнут при его допировании при высоком давлении (1...2 ГПа) (рис. 5, в). В результате приложения соответствующего давления происходит растяжение и изменение конформации макромолекул PANI, что также сопровождается делокализацией орбиталей поляронного уровня и превращением сравнительно узкой полосы соответствующего энергетического уровня в широкую поляронную зону, которая будет перекрываться с валентной зоной, т. е. в данном случае будет наблюдаться механизм проводимости, подобный металлическому [21].

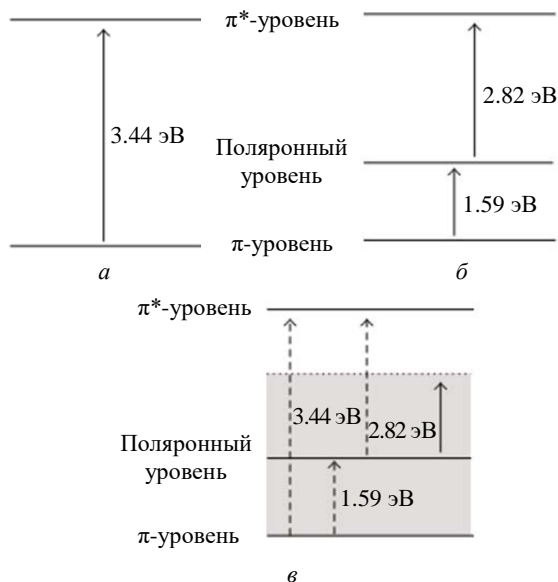


Рис. 5. Энергетическая зонная структура: а – PANI; б – допированного PANI; в – PANI, допированного при высоком давлении [21]

Fig. 5. Energy band structure: а – PANI; б – doped PANI; в – PANI doped at high pressure [21]

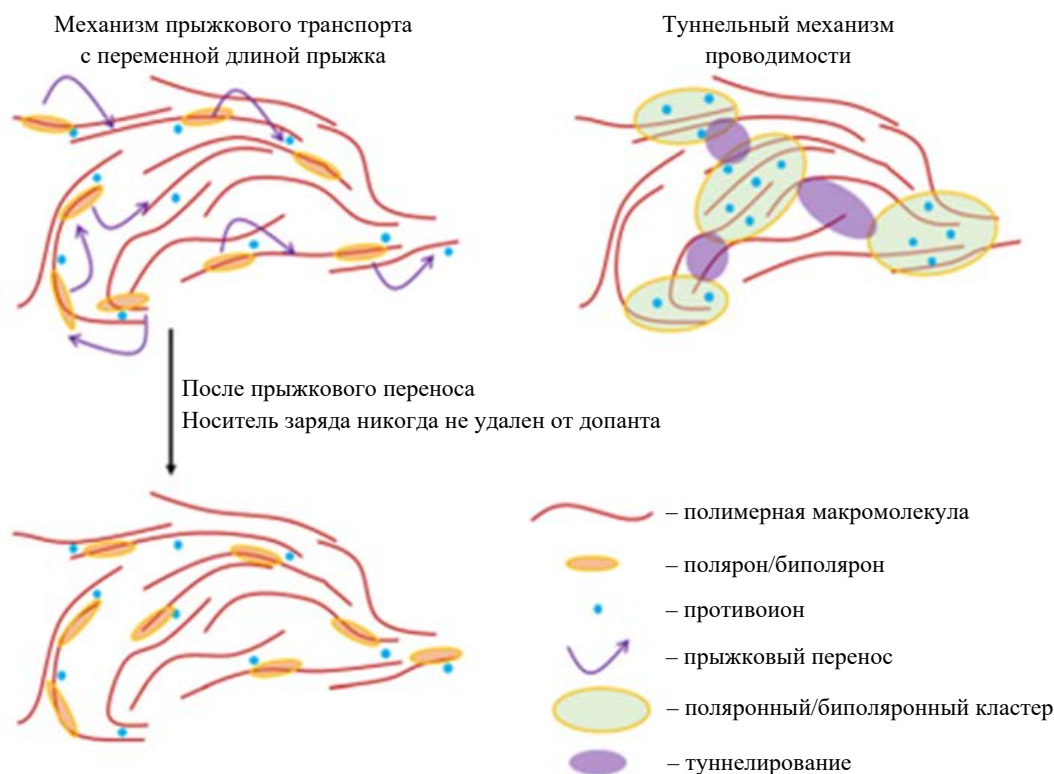


Рис. 6. Туннельный и прыжковый механизмы проводимости [26]

Fig. 6. Tunnel and hopping conduction mechanisms [26]

**Подходы к описанию механизма проводимости PANI.** Для описания проводимости PANI был предложен ряд теоретических моделей. В основе этих моделей лежит один из двух предельных механизмов: прыжкового транспорта с переменной длиной прыжка или туннелирование (рис. 6) [26].

Согласно теории туннельного механизма проводимости движение электронов сопоставляют с распространением плоской делокализованной волны в зоне проводимости. В рамках данной модели PANI рассматривается как гетерогенная структура. "Свободные" участки макромолекул PANI, т. е. находящиеся в некотором удалении от других фрагментов макромолекул, описаны как диэлектрические, изолированные зоны. При этом проводимость в данных участках можно характеризовать как квази-1D VRH-модель (от англ. Variable Range Hopping – перенос заряда с переменной длиной прыжка), полагая, что перенос заряда осуществляется по длине макромолекулы. Изолированная, аморфная зона занимает большую часть объема PANI. Также макромолекула PANI в некоторых об-

ластях вплотную прилегает к поверхности других макромолекул, что сопровождается межмолекулярными взаимодействиями соответствующих фрагментов и даже частичной делокализацией электронов. В данных узлах формируются своеобразные жгуты, пучки фактически металлической проводимости. В этих фрагментах перенос заряда осуществляется во всех направлениях (3D VRH-модель), т. е. в соответствии с моделью проводимости, в основе которой лежит механизм туннелирования, PANI представляет собой аморфную среду с локализованными областями металлической проводимости. Однако отметим, что большее признание получили модели, в основе которых лежит прыжковый механизм проводимости.

Для определения механизмов переноса электрических зарядов удобно исследовать температурные зависимости электропроводности  $\sigma$ , начиная с диапазона температур жидкого гелия и вплоть до высоких температур [27]. Ввиду неупорядоченности полупроводника была предложена модель прыжкового транспорта с переменной длиной прыжка – VRH-модель, в основе которой лежит выра-

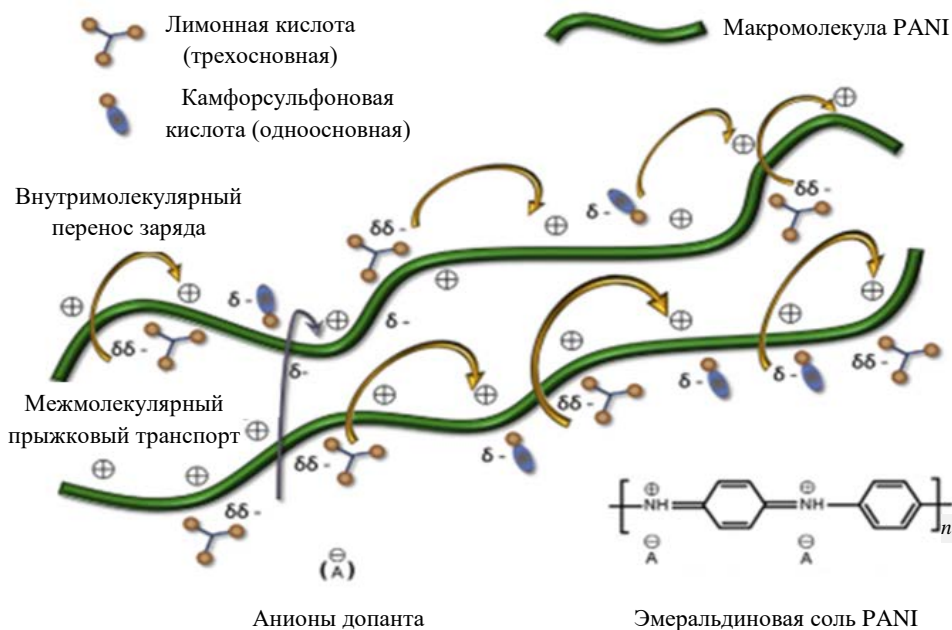


Рис. 7. Механизмы проводимости, соответствующие моделям 1D VRH и 3D VRH для допированного PANI [27]

Fig. 7. Conductivity mechanisms corresponding to the 1D VRH and 3D VRH models for doped PANI [27]

жение для зависимости электропроводности  $\sigma(T)$  полупроводника от температуры  $T$  – уравнение Мотта:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left[-(T/T_0)^\gamma\right],$$

где  $\gamma = 1/(d+1)$  – степенной коэффициент для  $d$ -мерного пространства [28]. Так, для  $d = 1$   $\gamma = 1/2$ , и этому случаю соответствует 1D VRH-модель, т. е. предполагается, что электропроводность происходит вдоль цепи макромолекулы в одной плоскости, что сопровождается 1D-локализацией электронов. Для 3D VRH-модели, в свою очередь,  $\gamma = 1/4$ , и проводимость в данном случае обуславливается межмолекулярным переносом заряда и спинов. В действительности для реальных систем зачастую сочетаются оба вышеупомянутых механизма прыжковой проводимости. Так, в [29] рассматривается двойное ("синергетическое") допирование PANI под действием лимонной и камфорсульфоновой кислот (рис. 7). Данные кислоты образуют разные анионы, отличающиеся друг от друга в том числе и величиной заряда. При подобном допировании может происходить перераспределение плотности заряда в различных участках макромолекулы PANI. Изменение плотности заряда в разных частях макромолекул PANI, в свою очередь, повышает

вероятность скачкообразного переноса заряда как по внутримолекулярному, так и по межмолекулярному механизму прыжкового транспорта, сопровождающегося соответствующей миграцией данных анионов.

Тип механизма проводимости PANI зависит в том числе от соотношения внутри- и межмолекулярного переноса. Значительное влияние на внутримолекулярную проводимость PANI оказывает длина сопряжения и количество дефектов в молекулярной цепи. В свою очередь, межмолекулярный перенос определяется в том числе степенью кристалличности полимера. Для PANI с низкой долей допирующих примесей проводимость преимущественно обусловлена переносом заряда между допированными участками макромолекулы по механизму прыжкового транспорта с переменной длиной прыжка [30]. В свою очередь, при увеличении уровня допирования полимера происходит упорядочение внутрицепочечной структуры, сопровождающееся фазовой сегрегацией на кристаллические проводящие и аморфные кристаллические области, т. е. увеличение степени кристалличности [31]. При этом перенос заряда осуществляется по механизму туннелирования и прыжковой проводимости между кристаллическими областями [14].

В свою очередь, существует модель Эфроса–Шкловского, которая при описании проводимости учитывает образование кулоновской щели – энергетического зазора, небольшого скачка плотности состояний вблизи уровня Ферми из-за взаимодействий между локализованными электронами [32]. Согласно данной модели фактор присутствия кулоновской щели оказывает влияние на температурную зависимость – для всех размерностей уравнение температурной зависимости проводимости PANI значение  $\gamma$  должно быть равно  $1/2$ , т. е. одним из следствий этой теории является то, что проводимость полимера не зависит от того, как с пространственной точки зрения (внутримолекулярно или межмолекулярно) осуществляется перенос

заряда. Следует отметить, что для эмеральдиновой соли в действительности значение  $\gamma$  лежит в интервале  $0.4 \dots 0.5$  [33].

**Закключение.** Таким образом, при описании механизма электропроводности PANI более применимыми моделями являются те, в основе которых лежат представления о прыжковом характере проводимости в PANI. В то же время в полной мере электропроводность PANI и его солей не соответствует ни одной из теоретических моделей (в первую очередь, ввиду неоднородности его структуры, чередования бензоидных и хиноидных мономерных звеньев, их соотношения в полимере и т. п.), и логично совместное приложение нескольких моделей для описания проводимости PANI в конкретном случае.

### Список литературы

1. Electronic conduction in polymers. I. The chemical structure of polypyrrole / R. McNeill, R. Siudak, Jh. Wardlaw, D. E. Weiss // Australian J. of Chemistry. 1963. Vol. 16, № 6. P. 1056–1075. doi: 10.1071/CH9631056
2. Boeva Z. A., Sergeyev V. G. Polyaniline: Synthesis, properties, and application // Polymer Science Series C. 2014. Vol. 56, № 1. P. 144–153. doi: 10.1134/S1811238214010032
3. Large-scale fabrication of pseudocapacitive glass windows that combine electrochromism and energy storage / P. Yang, P. Sun, Zh. Chai, L. Huang, X. Cai, Sh. Tan, J. Song, W. Mai // Angewandte Chemie. 2014. Vol. 126, № 44. P. 12129–12133. doi: 10.1002/ange.201407365
4. Electrochemically stable carbazole-derived polyaniline for pseudocapacitors / M. Almtiri, T. Dowell, H. Giri, D. O Wipf, C. N. Scott // ACS Applied Polymer Materials. 2022. Vol. 4, № 5. P. 3088–3097. doi: 10.1021/acspap.1c01616
5. Mozafari M., Chauhan N. P. S. Fundamentals and emerging applications of polyaniline. Netherlands: Elsevier, 2019. 308 p.
6. Новости нанотехнологий // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 7. С. 45–51.
7. Polyaniline nanowires-gold nanoparticles hybrid network based chemiresistive hydrogen sulfide sensor / M. D. Shirsat, M. A. Bangar, M. A. Deshusses, N. V. Myung, A. Mulchandani // Applied physics let. 2009. Vol. 94. № 8. Art. № 083502. doi: 10.1063/1.3070237
8. Highly sensitive glucose sensor based on Pt nanoparticle/polyaniline hydrogel heterostructures / D. Zhai, B. Liu, Yi Shi, L. Pan, Ya. Wang, W. Li, R. Zhang, G. Yu // ACS nano. 2013. Vol. 7, № 4. P. 3540–3546. doi: 10.1021/nn400482d
9. A novel polyquinone cathode material for rechargeable lithium batteries / L. Zhao, W. Wang,

- A. Wang, K. Yuan, Shi Chen, Yu. Yang // J. of power sources. 2013. Vol. 233. P. 23–27. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.01.103
10. Graphene/polyaniline nanofiber composites as supercapacitor electrodes / K. Zhang, L. L. Zhang, X. S. Zhao, J. Wu // Chemistry of Materials. 2010. Vol. 22, № 4. P. 1392–1401. doi: 10.1021/cm902876u
11. Лачинов А. Н., Салихов Р. Б., Бунаков А. А. Механизмы переноса заряда в тонких полимерных пленках // Изв. Российского гос. педагогического ун-та им. А. И. Герцена. 2015. Т. 5, № 13. С. 80–91.
12. Bhandari S. Polyaniline: structure and properties relationship // Polyaniline Blends, Composites and Nano-composites. 2018. P. 23–60. doi: 10.1016/B978-0-12-809551-5.00002-3
13. Stejskal J., Kratochvíl P., Jenkins A. D. The formation of polyaniline and the nature of its structures // Polymer. 1996. Vol. 37, № 2. P. 367–369. doi: 10.1016/0032-3861(96)81113-X
14. Chiang J. C., MacDiarmid A. G. ‘Polyaniline’: protonic acid doping of the emeraldine form to the metallic regime // Synthetic Metals. 1986. Vol. 13, № 1–3. P. 193–205. doi: 10.1016/0379-6779(86)90070-6
15. Polaron lattice in highly conducting polyaniline: Theoretical and optical studies / S. Stafström, J. L. Brédas, A. J. Epstein, H. S. Woo, D. B. Tanner, W. S. Huang, A. G. MacDiarmid // Physical Review Let. 1987. Vol. 59, № 13. P. 1464–1467. doi: 10.1103/PhysRevLett.59.1464
16. Polyaniline: a new concept in conducting polymers / A. G. MacDiarmid, J. C. Chiang, A. F. Richter, A. J. Epstein // Synthetic Metals. 1987. Vol. 18, № 1–3. P. 285–290. doi: 10.1016/0379-6779(87)90893-9
17. Тимонов А. М., Васильева С. В. Электронная проводимость полимерных соединений // Соросовский образовательный журн. 2000. Т. 6, № 3. С. 33–39.

18. Electron and proton conducting polymers: recent developments and prospects / G. Inzelt, M. Pineri, J. W. Schultze, M. A. Vorotyntsev // *Electrochimica Acta*. 2000. Vol. 45, № 15–16. P. 2403–2421. doi: 10.1016/S0013-4686(00)00329-7
19. Jaiswal M., Menon R. Polymer electronic materials: a review of charge transport // *Polymer international*. 2006. Vol. 55, № 12. P. 1371–1384. doi: 10.1002/PI.2111
20. Roth S., D. Carroll D. One-Dimensional Metals. 3<sup>rd</sup> ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2014. 335 p.
21. Pressure dependence of the electrical resistivity in polymer polyaniline / D. Huang, D. Xie, J. Gao, W. Lv, Sh. Hong // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. Vol. 2013, № 1. Art. № 124365. doi: 10.1155/2013/124365
22. Kwon O., McKee M. L. Calculations of band gaps in polyaniline from theoretical studies of oligomers // *The J. of Physical Chemistry B*. 2000. Vol. 104, № 8. P. 1686–1694. doi: 10.1021/jp9910946
23. Spectroscopy and defect states in polyaniline / R. P. McCall, J. M. Ginder, J. M. Leng, H. J. Ye, S. K. Manohar, J. G. Masters, G. E. Asturias, A. G. MacDiarmid, A. J. Epstein // *Physical Review B*. 1990. Vol. 41, № 8. Art. № 5202. doi: 10.1103/PhysRevB.41.5202
24. Enzymatically synthesized conducting polyaniline / W. Liu, Ja. Kumar, S. Tripathy, K. J. Senecal, L. Samuelson // *J. of the American Chemical Society*. 1999. Vol. 121, № 1. P. 71–78. doi: 10.1021/ja982270b
25. Wu C. G., Bein T. Polyaniline wires in oxidant-containing mesoporous channel hosts // *Chemistry of materials*. 1994. Vol. 6, № 8. P. 1109–1112. doi: 10.1021/cm00044a008
26. Progress in understanding structure and transport properties of PEDOT-based materials: A critical review / M. N. Gueye, A. Carella, J. Faure-Vincent, R. Demadrille, J.-P. Simonato // *Progress in Materials Science*. 2020. Vol. 108. Art. № 100616. doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100616
27. Rudenko R. M., Voitsihovska O. O., Poroshin V. N. Sequential change of semiconductor mechanisms of electrical conductivity in ternary PVDF/polyaniline/MWCNT nanocomposite in the wide temperature range of 4.2–340 K // *Materials Lett*. 2023. Vol. 350. Art. № 134976. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134976
28. Жмурова А. В. Механизмы электропроводности в нанокompозитах с проводящей полимерной матрицей // *Наука и современность*. 2015. № 39. С. 103–108. doi: 10.1002/app.44703
29. Bhandari S., Khastgir D. Synergistic effect of simultaneous dual doping in solvent-free mechanochemical synthesis of polyaniline supercapacitor comparable to the composites with multiwalled carbon nanotube // *Polymer*. 2015. Vol. 81. P. 62–69. doi: 10.1016/j.polymer.2015.10.015
30. Mott N. F., Davis E. A. *Electronic processes in non-crystalline materials*. Oxford: Oxford University Press, 2012. 608 p. doi: 10.1080/00107514.2014.933254
31. Study on the Crystallinity of Polyaniline / W. Fosong, T. Jinsong, W. Lixiang, Zh. Hongfang, Mo Zhishen // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 1988. Vol. 160, № 1. P. 175–184. doi: 10.1080/15421408808083012
32. Éfros A. L., Shklovskii B. I. Coulomb gap and low temperature conductivity of disordered systems // *J. of Physics C: Solid State Physics*. 1975. Vol. 8, № 4. P. L49. doi: 10.1088/0022-3719/8/4/003
33. Transport and EPR studies of polyaniline: A quasi-one-dimensional conductor with three-dimensional "metallic" states / Z. H. Wang, E. M. Scherr, A. G. MacDiarmid, A. J. Epstein // *Physical Review B*. 1992. Vol. 45, № 8. Art. № 4190. doi: 10.1103/PhysRevB.45.4190

### Информация об авторах

**Белугин Максим Вячеславович** – магистр по специальности "Химия биологически активных веществ" (2024, Курский государственный университет), аспирант 2-го года обучения по специальности "Теплофизика и теоретическая теплотехника" кафедры физики и нанотехнологий Курского государственного университета, инженер-химик ООО "Курский завод композитных материалов". Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – физика полупроводников; квантово-химические вычисления. Адрес: Курский государственный университет, ул. Радищева, д. 33, Курск, 305000, Россия  
E-mail: maksym.belugin@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-3932-1239>

**Будаев Артем Викторович** – кандидат физико-математических наук (2023), младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории наноструктурированных сегнетоэлектрических материалов, старший преподаватель кафедры физики и нанотехнологий Курского государственного университета. Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрические наноструктуры; нанокompозитные материалы; физика полупроводников. Адрес: Курский государственный университет, ул. Радищева, д. 33, Курск, 305000, Россия  
E-mail: budartem@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9703-3375>

## References

1. McNeill R., Siudak R., Wardlaw Jh., Weiss D. E. Electronic Conduction in Polymers. I. The Chemical Structure of Polypyrrole. Australian J. of Chemistry. 1963, vol. 16, no. 6, pp. 1056–1075.  
doi: 10.1071/CH9631056
2. Boeva Z. A., Sergeev V. G. Polyaniline: Synthesis, Properties, and Application. Polymer Science Series C. 2014, vol. 56, no. 1, pp. 144–153.  
doi: 10.1134/S1811238214010032
3. Yang P., Sun P., Chai Zh., Huang L., Cai X., Tan Sh., Song J., Mai W. Large-Scale Fabrication of Pseudocapacitive Glass Windows That Combine Electrochromism and Energy Storage. Angewandte Chemie. 2014, vol. 126, no. 44, pp. 12129–12133.  
doi: 10.1002/ange.201407365
4. Almtiri M., Dowell T., Giri H., Wipf D. O., Scott C. N. Electrochemically Stable Carbazole-Derived Polyaniline for Pseudocapacitors. ACS Applied Polymer Materials. 2022, vol. 4, no. 5, pp. 3088–3097.  
doi: 10.1021/acsapm.1c01616
5. Mozafari M., Chauhan N. P. S. Fundamentals and Emerging Applications of Polyaniline. Netherlands, Elsevier, 2019, 308 p.
6. News of Nanotechnology. Nano- and Microsystem Engineering. 2005, no. 7, pp. 45–51. (In Russ.)
7. Shirsat M. D., Bangar M. A., Deshusses M. A., Myung N. V., Mulchandani A. Polyaniline Nanowires-Gold Nanoparticles Hybrid Network Based Chemiresistive Hydrogen Sulfide Sensor. Applied Physics Lett. 2009, vol. 94, no. 8, art. no. 083502.  
doi: 10.1063/1.3070237
8. Zhai D., Liu B., Shi Yi, Pan L., Wang Ya., Li W., Zhang R., Yu G. Highly Sensitive Glucose Sensor Based on Pt Nanoparticle/Polyaniline Hydrogel Heterostructures. ACS Nano. 2013, vol. 7, no. 4, pp. 3540–3546.  
doi: 10.1021/nn400482d
9. Zhao L., Wang W., Wang A., Yuan K., Chen Shi, Yang Yu. A Novel Polyquinone Cathode Material for Rechargeable Lithium Batteries. J. of Power Sources. 2013, vol. 233, pp. 23–27.  
doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.01.103
10. Zhang K., Zhang L. L., Zhao X. S., Wu J. Graphene/Polyaniline Nanofiber Composites as Supercapacitor Electrodes. Chemistry of Materials. 2010, vol. 22, no. 4, pp. 1392–1401.  
doi: 10.1021/cm902876u
11. Lachinov A. N., Salikhov R. B., Bunakov A. A. Charge Transport Mechanisms in Thin Polymer Films. Izvestia: Herzen University J. of Humanities & Sciences. 2015, vol. 5, no. 13, pp. 80–91. (In Russ.)
12. Bhandari S. Polyaniline: Structure and Properties Relationship. Polyaniline Blends, Composites and Nano-composites. 2018, pp. 23–60.  
doi: 10.1016/B978-0-12-809551-5.00002-3
13. Stejskal J., Kratochvíl P., Jenkins A. D. The Formation of Polyaniline and the Nature of Its Structures. Polymer. 1996, vol. 37, no. 2, pp. 367–369.  
doi: 10.1016/0032-3861(96)81113-X
14. Chiang J. C., MacDiarmid A. G. ‘Polyaniline’: Protonic Acid Doping of the Emeraldine Form to the Metallic Regime. Synthetic Metals. 1986, vol. 13, no. 1–3, pp. 193–205.  
doi: 10.1016/0379-6779(86)90070-6
15. Stafström S., Brédas J. L., Epstein A. J., Woo H. S., Tanner D. B., Huang W. S., MacDiarmid A. G. Polaron Lattice in Highly Conducting Polyaniline: Theoretical and Optical Studies. Physical Review Lett. 1987, vol. 59, no. 13, pp. 1464–1467.  
doi: 10.1103/PhysRevLett.59.1464
16. MacDiarmid A. G., Chiang J. C., Richter A. F., Epstein A. J. Polyaniline: a New Concept in Conducting Polymers. Synthetic Metals. 1987, vol. 18, no. 1–3, pp. 285–290.  
doi: 10.1016/0379-6779(87)90893-9
17. Timonov A. M., Vasilyeva S. V. Electron Conductivity of Polymeric Compounds. Soros Educational J. 2000, vol. 6, no. 3, pp. 33–39. (In Russ.)
18. Inzelt G., Pineri M., Schultze J. W., Vorotyntsev M. A. Electron and Proton Conducting Polymers: Recent Developments and Prospects. Electrochimica Acta. 2000, vol. 45, no. 15–16, pp. 2403–2421.  
doi: 10.1016/S0013-4686(00)00329-7
19. Jaiswal M., Menon R. Polymer Electronic Materials: A Review of Charge Transport. Polymer International. 2006, vol. 55, no. 12, pp. 1371–1384.  
doi: 10.1002/PI.2111
20. Roth S., D. Carroll D. One-Dimensional Metals. 3<sup>rd</sup> ed. Weinheim, Wiley-VCH, 2014, 335 p.
21. Huang D., Xie D., Gao J., Lv W., Hong Sh. Pressure Dependence of the Electrical Resistivity in Polymer Polyaniline. Advances in Materials Science and Engineering. 2013, vol. 2013, no. 1, art. no. 124365.  
doi: 10.1155/2013/124365
22. Kwon O., McKee M. L. Calculations of Band Gaps in Polyaniline from Theoretical Studies of Oligomers. The J. of Physical Chemistry B. 2000, vol. 104, no. 8, pp. 1686–1694.  
doi: 10.1021/jp9910946
23. McCall R. P., Ginder J. M., Leng J. M., Ye H. J., Manohar S. K., Masters J. G., Asturias G. E., MacDiarmid A. G., Epstein A. J. Spectroscopy and Defect States in Polyaniline. Physical Review B. 1990, vol. 41, no. 8, art. no. 5202.  
doi: 10.1103/PhysRevB.41.5202
24. Liu W., Kumar Ja., Tripathy S., Senecal K. J., Samuelson L. Enzymatically Synthesized Conducting Polyaniline. J. of the American Chemical Society. 1999, vol. 121, no. 1, pp. 71–78.  
doi: 10.1021/ja982270b
25. Wu C. G., Bein T. Polyaniline Wires in Oxidant-Containing Mesoporous Channel Hosts. Chemistry of Materials. 1994, vol. 6, no. 8, pp. 1109–1112.  
doi: 10.1021/cm00044a008
26. Gueye M. N., Carella A., Faure-Vincent J., Demadrille R., Simonato J.-P. Progress in Understanding Structure and Transport Properties of PEDOT-

Based Materials: A Critical Review. Progress in Materials Science. 2020, vol. 108, art. no. 100616.

doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100616

27. Rudenko R. M., Voitsihovska O. O., Poroshin V. N. Sequential change of semiconductor mechanisms of electrical conductivity in ternary PVDF/polyaniline/MWCNT nanocomposite in the wide temperature range of 4.2–340 K. Materials Let. 2023, vol. 350, art. no. 134976.

doi: 10.1016/j.matlet.2023.134976

28. Zhmurova A. V. Mechanisms of Electrical Conductivity in Nanocomposites with a Conductive Polymer Matrix. Science and Modernity. 2015, no. 39, pp. 103–108. (In Russ.)

doi: 10.1002/app.44703

29. Bhandari S., Khastgir D. Synergistic Effect of Simultaneous Dual Doping in Solvent-Free Mechanochemical Synthesis of Polyaniline Supercapacitor Comparable to the Composites With Multiwalled Carbon Nanotube. Polymer. 2015, vol. 81, pp. 62–69.

doi: 10.1016/j.polymer.2015.10.015

30. Mott N. F., Davis E. A. Electronic Processes in Non-Crystalline Materials. Oxford, Oxford University Press, 2012, 608 p.

doi: 10.1080/00107514.2014.933254

31. Fosong W., Jinsong T., Lixiang W., Hongfang Zh., Zhishen Mo. Study on the Crystallinity of Polyaniline. Molecular Crystals and Liquid Crystals. 1988, vol. 160, no. 1, pp. 175–184.

doi: 10.1080/15421408808083012

32. Éfros A. L., Shklovskii B. I. Coulomb Gap and Low Temperature Conductivity of Disordered Systems. J. of Physics C: Solid State Physics. 1975, vol. 8, no. 4, p. L49.

doi: 10.1088/0022-3719/8/4/003

33. Wang Z. H., Scherr E. M., MacDiarmid A. G., Epstein A. J. Transport and EPR Studies of Polyaniline: a Quasi-One-Dimensional Conductor with Three-Dimensional "Metallic" States. Physical Review B. 1992, vol. 45, no. 8, art. no. 4190.

doi: 10.1103/PhysRevB.45.4190

### Information about the authors

**Maksim V. Belugin**, Master's degree in Chemistry of Biologically Active Substances (2024, Kursk State University), 2-year Postgraduate Student in "Thermal physics and theoretical heat engineering" of the Department of Physics and Nanotechnology of Kursk State University, chemical engineer of Kursk Composite Materials Plant LLC. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: semiconductor physics; quantum-chemical calculations.

Address: Kursk State University, 33, Radishcheva St., Kursk 305000 Russia

E-mail: maksym.belugin@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0004-3932-1239>

**Artem V. Budaev**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2023), Junior Researcher of the Research Laboratory of Nanostructured Ferroelectric Materials, Senior Lecturer of the Department of Physics and Nanotechnology of Kursk State University. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: ferroelectric nanostructures, nanocomposite materials; semiconductor physics.

Address: Kursk State University, 33, Radishcheva St., Kursk 305000 Russia

E-mail: budartem@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9703-3375>

---

## Фазовый метод измерения в радиовысотомере с непрерывным частотно-модулированным сигналом

А. А. Монаков 

Институт радиотехники и телекоммуникационных технологий,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

 [a\\_monakov@mail.ru](mailto:a_monakov@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Определена нижняя граница Крамера–Рао для среднеквадратической ошибки оценки высоты при использовании непрерывного частотно-модулированного периодического сигнала. На основании анализа границы установлено, что периодическое переключение частоты излучаемого сигнала между двумя значениями, разница которых равна выбранному значению девиации, является тем типом частотной модуляции, который позволяет реализовать потенциальную точность оценивания высоты в радиовысотомерах малых высот. Однако использование такого сигнала в существующих радиовысотомерах, основанных на измерении частоты сигнала биений, невозможно. Альтернативным решением является организация режима фазового измерения высоты.

**Цель работы.** Исследование возможности реализации режима фазового измерения высоты в следящем радиовысотомере малых высот, использующем для оценки замкнутый контур фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ), и проверка методом математического моделирования его работоспособности.

**Материалы и методы.** Предложена математическая модель следящего радиовысотомера с измерителем, использующим принципы ФАПЧ для реализации фазового метода измерения высоты.

**Результаты.** Математическое моделирование доказало работоспособность радиовысотомера с контуром ФАПЧ, в котором реализован фазовый метод измерения. При работе по плоской поверхности высотомер дает несмещенную и эффективную оценку высоты при отношениях сигнал/шум больших 5 дБ. В случае шероховатой поверхности качество оценки высоты в высотомере примерно на порядок выше по сравнению со следящими высотомерами, в которых реализован метод измерения на основе оценки частоты сигнала биений.

**Заключение.** Полученные в ходе математического моделирования данные свидетельствуют о возможности достижения потенциальной точности оценки высоты в радиовысотомере с контуром ФАПЧ, совмещающем частотный и фазовый режимы измерений. Дальнейшие исследования будут посвящены изучению влияния различных факторов на качество работы радиовысотомера и его схемотехнической реализации.

**Ключевые слова:** радиовысотомер, частотный метод измерения дальности, фазовый метод измерения дальности, фазовая автоматическая подстройка частоты

**Для цитирования:** Монаков А. А. Фазовый метод измерения в радиовысотомере с непрерывным частотно-модулированным сигналом // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 19–29.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-19-29

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; принята к публикации после рецензирования 29.12.2025; опубликована онлайн 30.04.2026



## Phase Estimation Method in a Radio Altimeter with a Continuous Frequency Modulated Signal

Andrey A. Monakov✉

Institute of Radio Technique and Telecommunication Technologies,  
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

✉ a\_monakov@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** The Cramér–Rao lower bound for the root-mean-square error of height estimation in radio altimeters with continuous frequency-modulated periodic signals is determined. Analysis of the bound showed that a periodic stepwise change in the emitted signal frequency between two levels, the difference between which is equal to the selected deviation value, is a type of frequency modulation that enables the potential altitude estimation accuracy of low-altitude radio altimeters. However, such signals cannot be used in existing radio altimeters that are based on beat frequency estimation. An alternative solution is to implement a phase-locked altitude measurement mode.

**Aim.** To investigate the feasibility of implementing a phase altitude measurement mode in a low-altitude tracking radio altimeter using a phase-locked loop (PLL) for altitude estimation, and to verify its performance using mathematical simulation.

**Materials and methods.** The stated problem was solved by constructing a mathematical model of a tracking radio altimeter with the PLL to implement the phase method for altitude estimation.

**Results.** The conducted computer simulation demonstrated the operability of the PLL-based radio altimeter that utilizes the phase method of altitude estimation. When operating over a perfectly flat surface, the altimeter provides an unbiased and effective altitude estimate with signal-to-noise ratios greater than 5 dB. In the case of a rough surface, the quality of altitude estimation in the altimeter is approximately an order of magnitude higher than in tracking altimeters, which implement estimation of the beat signal frequency.

**Conclusion.** The data obtained via computer simulation demonstrate the potential for achieving the height estimation accuracy in a PLL-based radio altimeter that combines frequency and phase measurement modes. Future research will examine the influence of various factors on the performance of the radio altimeter and its circuit design.

**Keywords:** radio altimeter, phase method of altitude estimation, frequency method of altitude estimation, phase-locked loop

**For citation:** Monakov A. A. Phase Estimation Method in a Radio Altimeter with a Continuous Frequency Modulated Signal. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 19–29.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-19-29

**Conflict of interest.** The author declares no conflicts of interest.

Submitted 13.10.2025; accepted 29.12.2025; published online 30.04.2026

**Введение.** Радиовысотомеры (РВ), излучающие непрерывные частотно-модулированные периодические сигналы, широко используются в авиации [1–5]. Эти системы отличает высокая точность измерения, которая достигается увеличением ширины спектра излучаемого сигнала, а также простота, экономичность и малые габариты приемопередающего модуля.

Принцип работы существующих РВ основан на получении в приемном устройстве сигнала биений (СБ) и оценке средней частоты этого сигнала. СБ получается на выходе смесителя приемника РВ, на входы которого подаются принятый и ослабленный излученный сигналы. В простейших несledящих РВ оценка средней частоты осу-

ществляется подсчетом количества пересечений СБ нулевого уровня за период модуляции [2, 4, 5]. В измерителе следящего РВ организуется петля обратной связи, с помощью которой происходит стабилизация частоты СБ на некотором постоянном уровне. Для этого в зависимости от полученной оценки высоты полета происходит подстройка периода частотной модуляции или девиации частоты излучаемого сигнала РВ [2, 4, 5].

Появление беспилотных летательных аппаратов инициировало поиск новых высокоточных методов измерения высоты полета [6–8]. В [9, 10] предлагается новый принцип измерения высоты в РВ, который основан на использовании измерительного контура фазовой авто-

матической подстройки опорного сигнала (ОС). Контур является модифицированным вариантом известной системы фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ), в который включен перестраиваемый генератор ОС. ОС представляет собой модель ожидаемого СБ, фазовый портрет которого меняется от одного периода модуляции к другому в зависимости от измеренной высоты. Математическое и натурное моделирование РВ с измерительным контуром ФАПЧ, которое проводилось при использовании зондирующего сигнала с несимметричным линейным (НЛЧМ), симметричным линейным (СЛЧМ) и гармоническим (ГЧМ) законами частотной модуляции, показало близкую к потенциально достижимой точность измерения высоты [11–14]. Важным результатом этих работ явилось установление факта зависимости точности оценки высоты от типа используемой частотной модуляции (ЧМ) при одинаковых значениях периода модуляции и девиации мгновенной частоты излучаемого сигнала. Это явилось стимулом к поиску такого закона ЧМ, который позволяет получить максимальную точность РВ.

Цель настоящей статьи – определить закон ЧМ излучаемого сигнала, который позволяет получить максимальную точность оценивания высоты до поверхности, и анализ возможности реализации РВ при таком законе.

Данная статья организована следующим образом. Вначале решается задача по вычислению потенциальной точности оценивания высоты при произвольном периодическом законе ЧМ. Здесь же определен тип ЧМ, который соответствует максимальной точности оценки. Далее рассмотрена математическая модель РВ с контуром ФАПЧ, который использует определенный ранее сигнал. Затем приводятся результаты компьютерного моделирования, когда поверхность земли идеально ровная и цилиндрическая шероховатая. В заключении делаются выводы по работе.

**Потенциальная точность оценки высоты.** Определим потенциальную точность оценки высоты в РВ с непрерывным излучаемым сигналом  $s_{\text{изл}}(t) = \exp[i\varphi_{\text{изл}}(t)]$ , закон ЧМ которого является периодическим. В силу периодичности ЧМ мгновенную частоту излучаемого сигнала

можно представить рядом Фурье

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T_M} t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T_M} t\right),$$

$$|\omega(t)| \leq \frac{\Delta\omega}{2},$$

где  $\omega_0$  – несущая частота;  $\Delta\omega$  – девиация мгновенной частоты;  $T_M$  – период ЧМ;  $a_k, b_k$  ( $k=1, 2, \dots$ ) – коэффициенты ряда Фурье. При этом фаза излучаемого сигнала

$$\varphi_{\text{изл}}(t) = \int_0^t \omega(t) dt =$$

$$= \omega_0 t + \frac{\Delta\omega T_M}{4\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{k} \sin\left(\frac{2\pi k}{T_M} t\right) -$$

$$- \frac{b_k}{k} \left[ \cos\left(\frac{2\pi k}{T_M} t\right) - 1 \right].$$

Если высота РВ над плоской подстилающей поверхностью равна  $H$ , то принятый сигнал  $s_{\text{пр}}(t) = \rho \exp[i(\varphi_{\text{пр}}(t) + \varphi)]$ , где  $\rho, \varphi$  – амплитуда и фаза сигнала, приобретаемые при отражении. Компонента фазы принятого сигнала  $\varphi_{\text{пр}}(t)$ , обусловленная распространением сигнала от РВ до поверхности и обратно:

$$\varphi_{\text{пр}}(t) = \int_0^t \omega(t - \tau) dt = \omega_0(t - \tau) +$$

$$+ \frac{\Delta\omega T_M}{4\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{k} \left[ \sin\left(\frac{2\pi k}{T_M}(t - \tau)\right) + \sin\left(\frac{2\pi k}{T_M} \tau\right) \right] -$$

$$- \frac{b_k}{k} \left[ \cos\left(\frac{2\pi k}{T_M}(t - \tau)\right) - \cos\left(\frac{2\pi k}{T_M} \tau\right) \right],$$

где  $\tau = 2H/c$  – время задержки ( $c$  – скорость света). Тогда СБ равен:

$$e_{\text{СБ}}(t) = s_{\text{пр}}(t) s_{\text{изл}}^*(t) =$$

$$= \rho \exp\left[i(\varphi_{\text{пр}}(t) - \varphi_{\text{изл}}(t))\right] =$$

$$= \rho \exp\left[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)\right],$$

где

$$\Phi(t, \tau) = \frac{\Delta\omega T_M}{4\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{k} \left[ \sin\left(\frac{2\pi k}{T_M}(t - \tau)\right) -$$

$$\begin{aligned} & -\sin\left(\frac{2\pi k}{T_M}t\right) + \sin\left(\frac{2\pi k}{T_M}\tau\right) \Big] - \\ & -\frac{b_k}{k} \left[ \cos\left(\frac{2\pi k}{T_M}(t-\tau)\right) - \right. \\ & \left. -\cos\left(\frac{2\pi k}{T_M}t\right) + 1 - \cos\left(\frac{2\pi k}{T_M}\tau\right) \right]; \quad (1) \end{aligned}$$

$(\cdot)^*$  – комплексное сопряжение. Сумма членов в (1), которые не зависят от времени  $t$ , может быть отнесена к неизвестной начальной фазе  $\varphi$ . При этом выражение для  $\Phi(t, \tau)$  упростится:

$$\begin{aligned} & \Phi(t, \tau) = \\ & = \frac{\Delta\omega T_M}{4\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{k} \left[ \sin\left(\frac{2\pi k}{T_M}(t-\tau)\right) - \sin\left(\frac{2\pi k}{T_M}t\right) \right] - \\ & - \frac{b_k}{k} \left[ \cos\left(\frac{2\pi k}{T_M}(t-\tau)\right) - \cos\left(\frac{2\pi k}{T_M}t\right) \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

Допустим, что прием СБ происходит на фоне белого шума:

$$r(t) = e_{\text{СБ}}(t) + w(t), \quad 0 \leq t \leq T_M,$$

где  $r(t)$  – принятый сигнал;  $w(t)$  – белый шум, спектральная плотность мощности которого равна  $N_0$ . Тогда, считая неизвестными величины  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $\tau$ , логарифм функционала правдоподобия

$$\begin{aligned} & L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) = \\ & = -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} |r(t) - \rho \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)]|^2 dt. \quad (3) \end{aligned}$$

В приложении показано, что при сделанных допущениях информационная матрица Фишера

$$\Phi = 2q^2 \begin{pmatrix} 1/\rho^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \overline{\Phi_\tau} \\ 0 & \overline{\Phi_\tau} & \overline{\Phi_\tau^2} \end{pmatrix},$$

где  $q^2 = E/N_0 = \rho^2 T_M/N_0$  – отношение сигнал/шум (ОСШ) на периоде модуляции;  $\overline{\Phi_\tau} = \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} \frac{\partial \Phi(t, \tau)}{\partial \tau} dt$ ;  $\overline{\Phi_\tau^2} = \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} \left[ \frac{\partial \Phi(t, \tau)}{\partial \tau} \right]^2 dt$  –

средние значения производной фазы  $\frac{\partial \Phi(t, \tau)}{\partial \tau}$  и ее квадрата на периоде модуляции. Обратив матрицу  $F$ , можно найти границу Крамера–Рао для среднеквадратической ошибки (СКО) оценки высоты

$$\begin{aligned} \sigma_H & = \frac{c}{\sqrt{8q^2 \left[ \overline{\Phi_\tau^2} - (\overline{\Phi_\tau})^2 \right]}} = \\ & = \frac{c}{\sqrt{8q^2 \left[ \frac{1}{T_M} \int_{-T_M/2}^{T_M/2} \omega^2(t) dt \right]}}, \quad (4) \end{aligned}$$

где учтено, что из (2) следует:  $\frac{\partial \Phi(t, \tau)}{\partial \tau} = -\omega(t-\tau)$  и  $\overline{\Phi_\tau} = 0$ .

Таким образом, для повышения точности оценки при заданных ОСШ  $q^2$  и девиации  $\Delta\omega$  следует увеличивать среднее значение квадрата мгновенной частоты  $\omega(t)$  излучаемого сигнала на периоде модуляции  $T_M$ . Уравнение (4) удобно представить в виде

$$\sigma_H = \frac{\gamma c}{q \Delta\omega},$$

где

$$\begin{aligned} \gamma & = \left[ \frac{2}{T_M} \int_{-T_M/2}^{T_M/2} \left( \frac{2\omega(t)}{\Delta\omega} \right)^2 dt \right]^{-1/2} = \\ & = \left[ \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kx + b_k \sin kx \right)^2 dx \right]^{-1/2} = \\ & = \left[ \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) \right]^{-1/2} \quad (5) \end{aligned}$$

– коэффициент, зависящий только от типа ЧМ. Для НЛЧМ, СЛЧМ и ГЧМ этот коэффициент соответственно равен:  $\gamma_{\text{НЛЧМ}} = \gamma_{\text{СЛЧМ}} = \sqrt{3/2}$ ,  $\gamma_{\text{ГЧМ}} = 1$ . Следовательно, из трех перечисленных законов самая высокая потенциальная точность оценки высоты будет при гармонической ЧМ излучаемого сигнала.

Уравнение (5) дает возможность определить такой закон ЧМ, который при заданной девиации

$\Delta\omega$  позволяет получить максимальную потенциальную точность оценки высоты. Этому закону соответствует минимальное значение коэффициента  $\gamma$  при условии, что мгновенная частота излучаемого сигнала  $\omega(t) \in [-\Delta\omega/2, \Delta\omega/2]$ , т. е. девиация частоты излучаемого сигнала фиксирована и равна  $\Delta\omega$ . Очевидно, что минимальному значению  $\gamma$  соответствует максимальное значение функционала

$$Q = \frac{2}{T_M} \int_{-T_M/2}^{T_M/2} \left( \frac{2\omega(t)}{\Delta\omega} \right)^2 dt,$$

которое, учитывая, что всегда  $|2\omega(t)/\Delta\omega| \leq 1$ , реализуется при следующем типе ЧМ:

$$\omega(t) = \frac{\Delta\omega}{2} \begin{cases} -1, & 0 \leq t < T_M/2; \\ +1, & T_M/2 \leq t < T_M. \end{cases} \quad (6)$$

При этом коэффициент  $\gamma$  принимает минимально возможное значение  $\gamma = 1/\sqrt{2}$ .

Таким образом, при заданной девиации  $\Delta\omega$  излучаемый непрерывный сигнал с периодическим переключением мгновенной частоты с уровня  $-\Delta\omega/2$  на уровень  $\Delta\omega/2$  и обратно позволяет максимально точно измерить дальность до гладкой подстилающей поверхности. Однако, используя такой сигнал, невозможно реализовать частотный метод измерения дальности, основанный на оценке средней частоты СБ, так как за исключением коротких интервалов времени длительностью, равной времени задержки  $\tau$ , частота СБ будет равна нулю. Поэтому для измерения дальности в этом случае необходимо реализовать фазовый режим измерения дальности в РВ. Такую возможность предоставляет только РВ с измерительным контуром ФАПЧ [9–11].

#### РВ с измерительным контуром ФАПЧ.

РВ непрерывного излучения с контуром ФАПЧ в качестве измерителя подробно описан в [5, 6]. Петля фазовой автоподстройки организована таким образом, чтобы происходила настройка ОС  $e_{OC}(t)$  по СБ  $e_{CB}(t)$ , который формируется на выходе смесителя приемника. Фазовый портрет ОС подобен фазовому портрету СБ при времени задержки  $\hat{\tau} = 2\hat{H}[n]/c$ , где  $\hat{H}[n]$  – оценка высоты на  $n$ -м периоде модуляции.

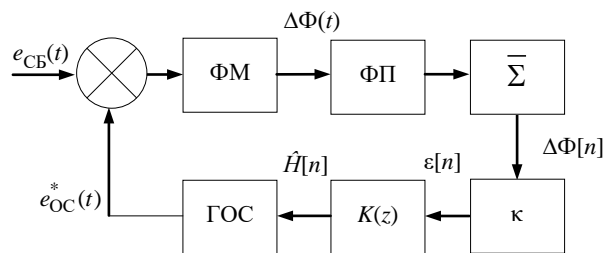


Рис. 1. Математическая модель измерительного контура ФАПЧ

Fig. 1. Mathematical model of the PLL measuring circuit

Структурная схема измерительного контура ФАПЧ представлена на рис. 1. Контур состоит из фазометра ФМ, который вычисляет разность фаз  $\Delta\Phi(t)$  СБ и ОС; фазового преобразователя ФП, выполняющего линейризацию  $\Delta\Phi(t)$  на периоде модуляции  $T_M$ ; усредняющего сумматора  $\bar{\Sigma}$ , формирующего значение средней разности фаз  $\Delta\Phi[n]$  на  $n$ -м периоде модуляции; масштабирующего преобразователя с коэффициентом передачи  $\kappa$ , выходным сигналом которого является сигнал ошибки  $\varepsilon[n]$ ; цифрового сглаживающего фильтра (ЦСФ) с коэффициентом передачи  $K(z)$ , в состав которого входит интегрирующее звено нужного порядка астатизма; перестраиваемого генератора опорного сигнала ГОС. Выходным сигналом ЦСФ является оценка высоты  $\hat{H}[n]$ . Благодаря контуру подстройки ОС в рассматриваемом РВ удастся создать режим слежения за высотой РВ. В зависимости от типа используемой ЧМ математическая модель контура несколько изменяется: при НЛЧМ необходимость в ФП отпадает, поскольку на всем периоде модуляции частота СБ сохраняет свой знак. Зоны обращения фазы при этом виде модуляции практически не влияют на фазовую структуру СБ, так как их длительность равна времени задержки  $\tau$ , а частота СБ на этих интервалах приближается к девиации частоты  $\Delta\omega$  излучаемого сигнала и не попадает в полосу контура слежения. Кроме того, масштабный множитель  $\kappa$  имеет различные значения для указанных видов ЧМ:  $\kappa_{НЛЧМ} = c/\Delta\omega$ ,  $\kappa_{СЛЧМ} = \kappa_{ГЧМ} = c/(2\Delta\omega)$ .

Рассмотрим работу приведенной схемы при излучаемом сигнале с ЧМ (6). Несложно показать, что в этом случае фаза СБ равна:

$$\varphi + \Phi(t, \tau) = \begin{cases} \Delta\omega t, & 0 \leq t \leq \tau; \\ \Delta\omega \tau, & \tau \leq t \leq T_M/2; \\ \Delta\omega \tau - \Delta\omega(t - T_M/2), & T_M/2 \leq t \leq T_M/2 + \tau; \\ 0, & T_M/2 + \tau \leq t \leq T_M, \end{cases}$$

где  $\varphi$  – начальная фаза.

Пренебрегая зонами обращения фазы на интервалах  $[0, \tau]$  и  $[T_M/2, T_M/2 + \tau]$ , в силу того, что длительность этих интервалов  $\tau \ll T_M$ , фазу СБ можно аппроксимировать следующим образом:

$$\varphi + \Phi(t, \tau) = \varphi + \begin{cases} \Delta\omega \tau, & 0 \leq t \leq T_M/2; \\ 0, & T_M/2 < t \leq T_M. \end{cases}$$

Тогда разность фаз СБ и ОС будет равна:

$$\Delta\Phi(t) = \varphi + \Phi(t, \tau) - \Phi(t, \hat{\tau}) = \begin{cases} \varphi + \Delta\omega(\tau - \hat{\tau}), & 0 \leq t \leq T_M/2; \\ \varphi, & T_M/2 < t \leq T_M. \end{cases}$$

Следовательно, для оценки дальности в ФП необходимо обратить разность фаз  $\Delta\Phi(t)$  на интервале  $[T_M/2, T_M]$  и в усредняющем сумматоре  $\bar{\Sigma}$  вычислить:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi[n] &= \\ &= \frac{2}{T_M} \left[ \int_0^{T_M/2} \Delta\Phi(t) dt + \int_{T_M/2}^{T_M} (-\Delta\Phi(t)) dt \right] = \\ &= \Delta\omega(\tau[n] - \hat{\tau}[n]) = \frac{2\Delta\omega}{c} (H[n] - \hat{H}[n]), \end{aligned}$$

где  $n$  – дискретное время, единицей которого является период модуляции  $T_M$ .

При этом коэффициент усиления  $k = c/(2\Delta\omega)$ , и сигнал ошибки будет равен разности истинной дальности и ее оценки на текущем  $n$ -м периоде модуляции, т. е.  $\varepsilon[n] = (H[n] - \hat{H}[n])$ . Этот сигнал через ЦСФ с коэффициентом передачи  $K(z)$  поступает на вход ГОС, который генерирует ОС  $e_{OC}(t) = \exp[i\Phi(t, \hat{\tau}[n])]$ . Таким образом замыкается контур ФАПЧ, и на выходе ЦСФ получается оценка высоты  $\hat{H}[n]$ .

Поскольку представленная на рис. 1 схема реализует фазовый метод измерения дальности, этой схеме присущ недостаток, характерный для

всех фазовых измерителей, – неоднозначность оценки. Очевидно, что диапазон однозначного измерения дальности для рассматриваемой схемы  $[-\kappa\pi, \kappa\pi] = \left[ -\frac{\pi c}{2\Delta\omega}, \frac{\pi c}{2\Delta\omega} \right]$ . Так, при  $\Delta f = \Delta\omega/(2\pi) = 100$  МГц ширина диапазона однозначного измерения дальности составляет 1.5 м. Поэтому РВ с рассмотренным ЧМ-сигналом может быть использован для уточнения измерений, выполненных той же схемой, но с другим типом ЧМ излучаемого сигнала (например, с ГЧМ) при реализации частотного метода оценивания. Схема РВ при этом не изменяется. Меняется лишь алгоритм работы ФП и ГОС.

Чтобы определить точность оценки высоты в РВ с измерительным контуром ФАПЧ и фазовым режимом измерений при работе по сигналам, отраженным от плоской и шероховатой поверхности, использовалось математическое моделирование.

**Результаты математического моделирования.** Математическое моделирование предусматривало 2 испытания:

- 1) оценку высоты до плоской поверхности при разных ОСШ  $q^2$ ;
- 2) оценку высоты до шероховатой поверхности при разных значениях параметра шероховатости  $p = \sqrt{2} \cdot k_w \sigma$  и движении РВ, где  $k_w = \omega_0/c$  – волновое число;  $\sigma$  – СКО высот шероховатости поверхности.

Сценарные параметры моделирования были выбраны следующими:

- высота РВ  $H = 150$  м;
- скорость РВ  $v = 100$  м/с;
- девиация частоты  $\Delta f = 100$  МГц;
- период модуляции  $T_M = 1$  мс;
- частота свободных колебаний замкнутого контура ФАПЧ  $\omega_{ФАПЧ} = 2\pi \times 10$  рад/с;
- перерегулирование следящего контура  $\Delta = 0.3$ ;
- распределение высот шероховатости – нормальное  $\mathcal{N}(0, \sigma^2 r(x))$  с нулевым математическим ожиданием, дисперсией  $\sigma^2$  и коэффициентом корреляции  $r(x) = \exp[-(x/L)^2]$ , где  $L = 3$  м – радиус корреляции случайных высот;
- количество статистических испытаний  $K = 1000$ .

ЦСФ следящего контура ФАПЧ имеет второй порядок астатизма и синтезирован методом билинейного преобразования [15] при аналоговом прототипе с коэффициентом передачи

$$K(s) = \frac{k_{\text{ФАПЧ}}(sT_{\text{ФАПЧ}} + 1)}{s^2},$$

где  $k_{\text{ФАПЧ}}$  – статический коэффициент усиления и  $T_{\text{ФАПЧ}}$  – постоянная времени фильтра выбирались таким образом, чтобы замкнутый следящий контур имел заданные сценарные параметры  $\omega_{\text{ФАПЧ}}$  и  $\Delta$ .

Результаты первой серии испытаний – зависимости смещения  $b_H$  и СКО  $\sigma_H$  оценки высоты от ОСШ  $q^2$  при работе по плоской поверхности ( $\sigma = 0$ ) приведены на рис. 2 для всех четырех типов ЧМ излучаемого сигнала. Спектральная плотность мощности  $N_0$  аддитивного белого шума, на фоне которого моделировался СБ, рассчитывалась исходя из заданного ОСШ  $q^2 = A^2 T_M / N_0$ , где  $A = 1$  – амплитуда СБ.

Полученные зависимости свидетельствуют о высокой точности РВ с контуром ФАПЧ при реализации фазового метода измерения высоты. Аномальные ошибки оценки высоты исчезают при ОСШ  $q^2 > 5$  дБ, и параметры точности измерителя становятся близкими к потенциально до-

стижимым. Оценка высоты имеет практически нулевое смещение, а СКО меньше соответствующих показателей для других типов ЧМ излучаемого сигнала и монотонно уменьшается с увеличением ОСШ. Так, при  $q^2 = 20$  дБ ошибка измерения высоты имеет смещение 0.2 мм и СКО 9 мм.

Шероховатая поверхность моделировалась набором точек со случайной высотой. Расстояние между отсчетами было равно 1/16 длины волны РВ, радиус корреляции случайных высот  $L = 3$  м. На рис. 3 приведены зависимости смещения  $b_H$  и СКО  $\sigma_H$  оценки высоты от параметра шероховатости поверхности  $p$  при ОСШ  $q^2 = 40$  дБ (большое ОСШ было выбрано для того, чтобы объективно оценить влияние степени шероховатости поверхности на точность оценки высоты). Как видно из рисунка, характеристики всех оценок ухудшаются с увеличением параметра  $p$ . Но и в данной серии испытаний РВ с фазовым измерением высоты показывает лучшие результаты: при  $p = 2$  смещение  $b_H = 1.3$  мм и СКО  $\sigma_H = 2.8$  мм, против  $b_H = 1.0$  мм и  $b_H = 28$  мм для ГЧМ.

**Заключение.** В статье доказана зависимость точности оценки высоты в РВ, который излучает непрерывный периодический частотно-модулированный сигнал, от типа ЧМ. Показано, что максимальная точность при заданной де-

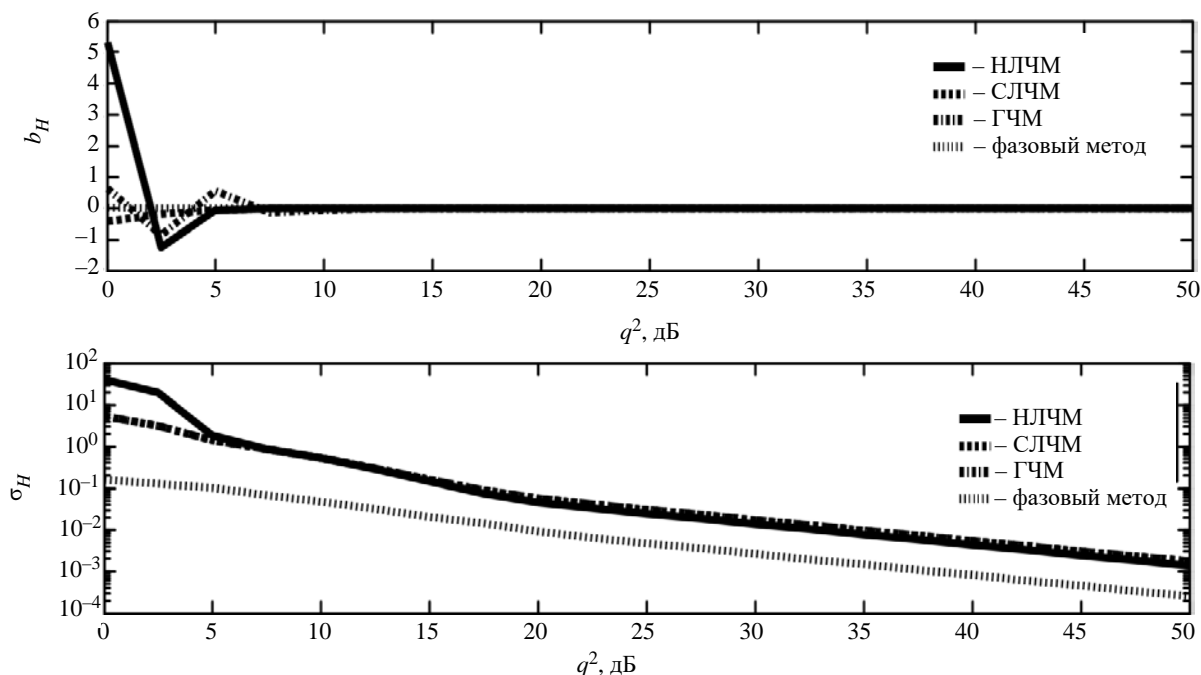


Рис. 2. Зависимости смещения и СКО оценки высоты от ОСШ  $q^2$  при работе РВ по плоской поверхности

Fig. 2. Estimate bias and standard deviation versus the SNR  $q^2$  when the radioaltimeter operates over a flat surface

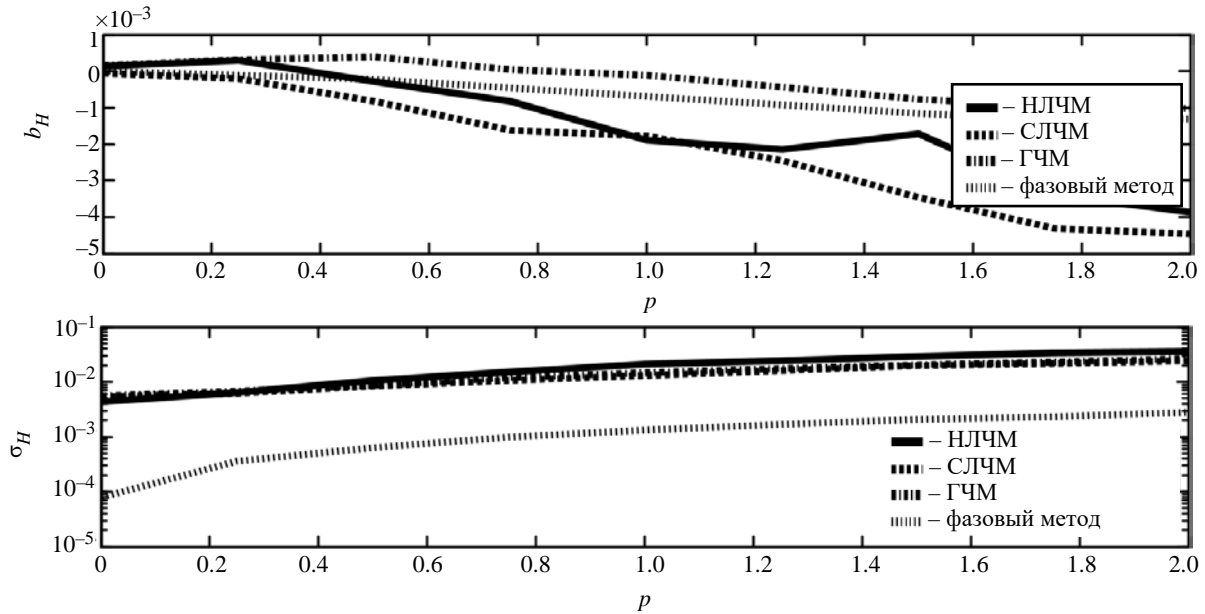


Рис. 3. Зависимости смещения и СКО оценки высоты от параметра шероховатости  $p$  при работе РВ по шероховатой поверхности при ОСШ  $q^2 = 40$  дБ

Fig. 3. Estimate bias and standard deviation versus the roughness parameter  $p$  when the radioaltimeter operates over a rough surface and SNR  $q^2 = 40$  dB

виации мгновенной частоты достигается при периодическом скачкообразном переключении мгновенной частоты между двумя уровнями, разница значений которых равна выбранной девиации. При таком сигнале невозможна реализация частотного метода измерения высоты. Однако использование РВ с измерительным контуром ФАПЧ позволяет реализовать режим высокоточной фазовой оценки. При этом необходимо учитывать, что фазовому методу измерения свойственна неоднозначность. В статье показано, что ширина интервала однозначного измерения высоты обратно пропорциональна девиации частоты излучаемого сигнала. Поэтому режим фазового измерения в РВ с контуром ФАПЧ может использоваться для уточнения оценки высоты в дополнение к режиму частотного измерения, когда частота излученного сигнала периодически меняется, например по гармоническому закону. Переход между режимами частотного и фазового измерения не требует изменения структурной схемы дальномера. Математическое моделирование высотомера с контуром ФАПЧ и непрерывным периодическим сигналом со скачкообразным изменением частоты подтвердило высокую точность измерения высоты.

**Приложение. Граница Крамера–Рао для дисперсии оценки высоты.** Перепишем функционал правдоподобия (3) в виде

$$L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) = C - \frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (\rho^2 - r^*(t)\rho \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] - r(t)\rho \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)]) dt,$$

где  $C$  – независимая от переменных  $\rho, \varphi, \tau$  постоянная. Первые производные функционала по неизвестным переменным равны:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \rho} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (2\rho - r^*(t) \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] - r(t) \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)]) dt; \\ \frac{\partial}{\partial \varphi} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (-ir^*(t)\rho \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] + ir(t)\rho \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)]) dt; \\ \frac{\partial}{\partial \tau} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (-ir^*(t)\rho \Phi'_\tau(t, \tau) \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] + ir(t)\rho \Phi'_\tau(t, \tau) \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)]) dt, \end{aligned} \right.$$

где  $\Phi'_\tau(t, \tau) = \frac{\partial}{\partial \tau} \Phi(t, \tau)$ .

Вторые производные функционала по неизвестным переменным равны:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= -\frac{2\rho T_M}{N_0}; \\ \frac{\partial}{\partial \rho \partial \varphi} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= \\ &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} \left( -ir^*(t) \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] + \right. \\ &+ \left. ir(t) \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] \right) dt; \\ \frac{\partial}{\partial \rho \partial \tau} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= \\ &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} \left( -ir^*(t) \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] + \right. \\ &+ \left. ir(t) \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] \right) \Phi'_\tau(t, \tau) dt; \\ \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= \\ &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} \left( r^*(t) \rho \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] + \right. \\ &+ \left. r(t) \rho \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] \right) dt; \\ \frac{\partial^2}{\partial \varphi \partial \tau} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= \\ &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} \left( r^*(t) \rho \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] + \right. \\ &+ \left. r(t) \rho \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] \right) \Phi'_\tau(t, \tau) dt; \\ \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} L(\rho, \varphi, \tau | r(t)) &= \\ &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} \left( r^*(t) \rho \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] + \right. \\ &+ \left. r(t) \rho \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] \right) [\Phi'_\tau(t, \tau)]^2 dt - \\ &- \frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} \left( -ir^*(t) \rho \exp[i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] + \right. \\ &+ \left. ir(t) \rho \exp[-i(\Phi(t, \tau) + \varphi)] \right) \Phi''_\tau(t, \tau) dt, \end{aligned} \right.$$

где  $\Phi''_\tau(t, \tau) = \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \Phi(t, \tau)$ . Учитывая, что  $r(t) = e_{\text{СБ}}(t) + w(t)$ ,  $0 \leq t \leq T_M$ , после усреднения по шумовой компоненте  $w(t)$  получим уравнения для элементов матрицы Фишера

$$\left\{ \begin{aligned} F_{11} &= -\frac{2\rho T_M}{N_0}; \\ F_{12} &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (-i\rho + i\rho) dt = 0; \\ F_{13} &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (-i\rho + i\rho) \Phi'_\tau(t, \tau) dt = 0; \\ F_{22} &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (\rho^2 + \rho^2) dt = -\frac{2\rho^2 T_M}{N_0}; \\ F_{23} &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (\rho^2 + \rho^2) \Phi'_\tau(t, \tau) dt = \\ &= -\frac{2\rho^2 T_M}{N_0} \overline{\Phi'_\tau}; \\ F_{33} &= -\frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (\rho^2 + \rho^2) [\Phi'_\tau(t, \tau)]^2 dt - \\ &- \frac{1}{N_0} \int_0^{T_M} (-i\rho^2 + i\rho^2) \Phi''_\tau(t, \tau) dt = -\frac{2\rho^2 T_M}{N_0} \overline{\Phi_\tau^2}; \end{aligned} \right.$$

где  $\overline{\Phi'_\tau} = \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} \Phi'_\tau(t, \tau) dt$  и  $\overline{\Phi_\tau^2} =$

$= \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} [\Phi'_\tau(t, \tau)]^2 dt$ . Учитывая, что энергия

СБ на периоде модуляции  $E = \rho^2 T_M$ , матрицу Фишера можно записать в виде

$$F = 2q^2 \begin{pmatrix} 1/\rho^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \overline{\Phi_\tau} \\ 0 & \overline{\Phi_\tau} & \overline{\Phi_\tau^2} \end{pmatrix}.$$

Обратная матрица при этом равна

$$F^{-1} = \frac{1}{2q^2} \begin{pmatrix} \rho^2 & 0 & 0 \\ 0 & \overline{\Phi_\tau^2}/\Delta & -\overline{\Phi_\tau}/\Delta \\ 0 & -\overline{\Phi_\tau}/\Delta & 1/\Delta \end{pmatrix},$$

где  $\Delta = \overline{\Phi_\tau^2} - (\overline{\Phi_\tau})^2$ . Следовательно, дисперсия оценки времени запаздывания равна  $\sigma_\tau^2 = 1/(2q^2\Delta)$ , а дисперсия оценки высоты

$$\sigma_H^2 = (c/2)^2 \sigma_\tau^2 = c^2/(8q^2\Delta).$$

Таким образом, дисперсия оценки высоты обратно пропорциональна отношению сигнал/шум  $q^2$  и параметру  $\Delta$ .

### Список литературы

1. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2014. 680 с.
2. Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И. Теоретические основы радиовысотометрии / под ред. А. П. Жуковского. М.: Сов. радио, 1979. 320 с.
3. Авиационная радионавигация: справ. / А. А. Сосновский, А. И. Хаймович, Э. А. Лутин, И. Б. Максимов; под ред. А. А. Сосновского. М.: Транспорт, 1990. 264 с.
4. Yanovsky F. J., Nebylov A. V. Radar Altimeters / Aerospace Sensors. 1<sup>st</sup> ed., ch. 3. New York: Momentum Press, 2013. P. 55–88.
5. Комаров И. В., Смольский С. М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно модулированных колебаний. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 392 с.
6. Improved Frequency Estimation Technique for FMCW Radar Altimeters / S. Reshma, P. R. Midhunkrishna, S. Joy, S. Sreelal, M. Vanidevi // Intern. Conf. on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT), Bangalore, India, 27–28 Aug. 2021. IEEE, 2021. P. 185–189. doi: 10.1109/RTEICT52294.2021.9573544
7. Ha J.-S.; Hong S.-Y. Altimetry Method for an Interferometric Radar Altimeter Based on a Phase Quality Evaluation // Sensors. 2023. Vol. 23, iss. 12. Art. № 5508. doi: 10.3390/s23125508
8. Advancing mmWave Altimetry for Unmanned Aerial Systems: A Signal Processing Framework for Optimized Waveform Design / M. A. Awan, Y. Dalveren, A. Kara, M. Derawi // Drones. 2024. Vol. 8, № 9. Art. № 440. doi: 10.3390/drones8090440
9. Монаков А. А., Тарасенков А. А. Следящий радиовысотометр малых высот с системой ФАПЧ // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 2. С. 54–63. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-54-63
10. Пат. RU 207967 U1 G01S 13/34 (2021.08) H04L 25/03 (2021.08). Радиовысотометр с непрерывным излучением и фазовой автоподстройкой опорного сигнала / А. А. Монаков, А. А. Тарасенков. Оpubл. 29.11.2021. Бюл. № 34.
11. Монаков А. А., Тарасенков А. А. Сравнительный анализ математических моделей следящих радиовысотометров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 72–80. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-72-80
12. Тарасенков А. А. Экспериментальная оценка точности радиовысотометра малых высот с контуром фазовой автоматической подстройки частоты // Датчики и системы. 2023. № 2 (267). С. 29–35. doi: 10.25728/datsys.2023.2.6
13. Тарасенков А. А. Влияние типа частотной модуляции на точность радиодальномера непрерывного излучения // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2024. № 1. С. 52–59.
14. Тарасенков А. А. Сравнительные натурные испытания следящих радиодальномеров непрерывного излучения // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2024. № 1. С. 60–68.
15. Опенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. С. А. Кулешова; под ред. А. Б. Сергиенко. 2-е изд., испр. М.: Техносфера, 2007. 856 с.

### Информация об авторе

**Монаков Андрей Алексеевич** – доктор технических наук (2000), профессор (2005) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Почетный машиностроитель РФ (2005), почетный работник высшего профессионального образования РФ (2006). Автор более 230 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация протяженных целей; цифровая обработка сигналов; радиолокаторы с синтезированной апертурой, исследование природных сред радиотехническими методами; управление воздушным движением.

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

E-mail: a\_monakov@mail.ru

https://orcid.org/0000-0003-4469-0501

### References

1. Skolnik M. I. Radar Handbook. 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill Education, 2008, 1328 p.
2. Zhukovskii A. P., Onoprienko E. I., Chizhov V. I. *Teoreticheskie osnovy radiovysotometrii* [Theory of Radio Altimetry]. Moscow, Sov. radio, 1979, 320 p. (In Russ.)
3. Sosnovskii A. A., Khaimovich A. I., Lutin E. A., Maksimov I. B. *Aviatsionnaya radionavigatsiya: Spravochnik*. [Air Navigation Aids. Handbook] Moscow, Transport, 1990, 264 p. (In Russ.)

4. Yanovsky F. J., Nebylov A. V. Radar Altimeters. In: *Aerospace Sensors*. 1<sup>st</sup> ed., ch. 3. New York, Momentum Press, 2013, pp. 55–88.
5. Komarov I. V., Smol'skii S. M. *Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem s nepreryvnym izlucheniem chastotno modulirovannykh kolebaniy* [Foundations of Radar Systems with Continuous Wave Frequency Modulated Signals]. Moscow, *Goryachaya Liniya Telecom*, 2010, 392 p. (In Russ.)
6. Reshma S., Midhunkrishna P. R., Joy S., Sreelal S., Vanidevi M. Improved Frequency Estimation Technique for FMCW Radar Altimeters. Intern. Conf. on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT), Bangalore, India, 27–28 Aug. 2021. IEEE, 2021, pp. 185–189. doi: 10.1109/RTEICT52294.2021.9573544
7. Ha J.-S.; Hong S.-Y. Altimetry Method for an Interferometric Radar Altimeter Based on a Phase Quality Evaluation. *Sensors*. 2023, vol. 23, iss. 12, art. no. 5508. doi: 10.3390/s23125508
8. Awan M. A., Dalveren Y., Kara A., Derawi M. Advancing mmWave Altimetry for Unmanned Aerial Systems: A Signal Processing Framework for Optimized Waveform Design. *Drones*. 2024, vol. 8, no. 9, art. no. 440. doi: 10.3390/drones8090440
9. Monakov A. A., Tarasnikov A. A. Low-Range Tracking Radio Altimeter with the Phase-Locked Loop. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 2, pp. 54–63 (In Russ.) doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-54-63
10. Monakov A. A., Tarasnikov A. A. FMCW Radio Altimeter with the PLL to Adjust the Reference Signal. Pat. RU 207967 U1 G01S 13/34 (2021.08) H04L 25/03 (2021.08) (In Russ.).
11. Monakov A. A., Tarasnikov A. A. Comparative Analysis of Mathematical Models of Tracking Radio Altimeters. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 72–80 (In Russ.) doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-72-80
12. Tarasnikov A. A. Experimental Accuracy Assessment of a Low Range Radio Altimeter with the Measuring Phase Locked Loop. *Sensors & Systems*. 2023, no. 2, pp. 29–35. (In Russ.)
13. Tarasnikov A. A. Influence of the Frequency Modulation Law's Form on the Potential Accuracy of a Continuous Wave Radar. *Vopr. radioelektroniki. Ser. Tehnika teledeniya*. 2024, no. 1, pp. 52–59. (In Russ.)
14. Tarasnikov A. A. Comparative Field Tests of Continuous Wave Tracking Radar Range Meters. *Vopr. radioelektroniki. Ser. Tehnika teledeniya*. 2024, no. 1, pp. 60–68. (In Russ.)
15. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. *Digital Signal Processing*. New Jersey, Prentice-Hall, 1975, 585 p.

#### Information about the author

**Andrey A. Monakov**, Dr Sci. (Eng.) (2000), Professor (2005) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Honored Mechanical Engineer of the Russian Federation (2005), Honored Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2006). The author of more than 230 scientific publications. Area of expertise: radar theory of extended targets; digital signal processing; synthetic aperture radar; remote sensing; air traffic control.

Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67 A, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: a\_monakov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4469-0501>

## Селекция полезного сигнала на основе анализа эхолокационной трассы с использованием методов машинного обучения

И. С. Писарев<sup>✉</sup>, А. А. Ухов

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

<sup>✉</sup> [ilya.pisarev91@gmail.com](mailto:ilya.pisarev91@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** При измерении расстояния лазерным дальномером на пути следования луча встречаются помехи, влияющие на точность измерения расстояния. Классические алгоритмы фильтрации, анализирующие характеристики полученного сигнала, не могут отделить сигналы от естественных помех и целей. В рамках описываемой работы был предложен алгоритм классификации объектов с использованием методов обработки сигналов эхолокационной трассы, полученных при вертикальном зондировании с помощью лазерного дальномера. Основной задачей является селекция полезных сигналов на фоне естественных помех, таких, как атмосферные аэрозоли, дымка и облака. Для решения проблемы предложен метод выделения пиков интенсивности на эхолокационной трассе с последующей их классификацией с использованием методов машинного обучения. Благодаря предобработке сигнала возможна работа алгоритма с системами, имеющими разные параметры излучателя и приемного канала.

**Цель работы.** Разработать алгоритм выделения и классификации объектов на эхолокационной трассе, полученной при вертикальном зондировании с помощью лазерного дальномера.

**Материалы и методы.** Вертикальное зондирование осуществлялось с помощью экспериментального стенда, включающего в себя лазерный дальномер с источником излучения 100 мДж, длиной волны 1064 нм, что позволило собрать данные в различных метеорологических условиях. В выборку вошли эхолокационные трассы, полученные от разных объектов с различными характеристиками, например монолитные конструкции, решетчатые конструкции и естественные помехи, встречающиеся при вертикальном зондировании. В статье проведен сравнительный анализ алгоритмов: логистической регрессии, случайного леса, градиентного бустинга и нейросетевого алгоритма. Для оценки качества предсказания моделей были выбраны метрики ассигасу и F1-score. Обучение моделей выполнялось на датасете, включающем облачные структуры, с разделением на обучающую и тестовую выборки.

**Результаты.** Модель градиентного бустинга продемонстрировала сопоставимый результат с нейросетевым алгоритмом, показав результат F1-score 0.89 на тестовой выборке, что позволяет использовать его в менее производительных системах без потери качества предсказания.

**Заключение.** Результаты подтверждают эффективность алгоритма для выделения полезного сигнала, полученного от объектов в условиях помех, что актуально для геодезии, навигации и спутникового зондирования.

**Ключевые слова:** дальнометрия, обработка сигналов, вертикальное зондирование, методы разметки данных, машинное обучение

**Для цитирования:** Писарев И. С., Ухов А. А. Селекция полезного сигнала на основе анализа эхолокационной трассы с использованием методов машинного обучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 30–38.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-30-38

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

Статья поступила в редакцию 15.10.2025; принята к публикации после рецензирования 12.02.2026; опубликована онлайн 30.04.2026

## Useful Signal Discrimination Based on Echolocation Path Analysis Using Machine Learning Methods

Илья С. Писарев✉, Андрей А. Ухов

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ ilya.pisarev91@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** When measuring the distance with a laser rangefinder, interference along the path of the beam can significantly affect measurement accuracy. Classical filtering algorithms, which rely on the characteristics of the received signal, are unable to reliably distinguish the useful signals from natural interference and targets. In this work, we propose an algorithm for classifying objects based on processing echolocation path signals obtained by vertical laser rangefinder sensing. The main task is to distinguish useful signals against the background of natural interference, such as atmospheric aerosols, haze, and clouds. The problem is solved by a method based on isolating intensity peaks on an echolocation path, followed by their classification using machine learning methods. Owing to the preprocessing of the signal, the algorithm is compatible with systems having different parameters of the emitter and the receiving channel.

**Aim.** To develop an algorithm for identifying and classifying objects on an echolocation path obtained by vertical sensing using a laser rangefinder.

**Materials and methods.** Vertical sensing was carried out using an experimental stand, which includes a laser rangefinder with a radiation source of 100 mJ and a wavelength of 1064 nm. This made it possible to collect data in various meteorological conditions. The sample included echolocation traces obtained from different objects with different characteristics, such as monolithic structures, lattice structures, and natural interference encountered during vertical sensing. A comparative analysis of the following algorithms was conducted: logistic regression, random forest, gradient boosting, and a neural network algorithm. The metrics accuracy and F1-score were chosen to evaluate the prediction quality of the models. The models were trained on a dataset containing cloud structures, with a split into training and test sets.

**Results.** The gradient boosting model demonstrated performance comparable with that of the neural network algorithm, achieving an F1-score of 0.89 on the test set. This makes it suitable for deployment in resource-limited systems without compromising predictive performance.

**Conclusion.** The results confirm the effectiveness of the algorithm for useful signal discrimination under interference conditions, which is important for geodesy, navigation, and satellite sensing.

**Keywords:** rangefinder, signal processing, vertical sensing, data markup methods, machine learning

**For citation:** Pisarev I. S., Uhov A. A. Useful Signal Discrimination Based on Echolocation Path Analysis Using Machine Learning Methods. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 30–38.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-30-38

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

Submitted 15.10.2025; accepted 12.02.2026; published online 30.04.2026

**Введение.** При решении задач измерения расстояния между двумя объектами часто используют лазерные дальномеры. Высокая точность измерений, возможность измерения больших расстояний, скорость измерений, простота интеграции измерителя в общее программное обеспечение позволяют применять его в геодезии, навигации, картографии и других областях.

При проектировании лазерных дальномеров

уделяют внимание способам обработки принимаемой информации. Это может быть пороговый метод или метод полной оцифровки принимаемой эхолокационной трассы, что позволяет усложнять алгоритм обработки данных для противодействия ложным срабатываниям [1]. Также продумывается сценарий использования и задаются не только параметры цели, до которой предполагается производить измере-

ния, но и объектов, которые могут встретиться на пути следования луча. Чаще всего сталкиваются с ландшафтными помехами типа "куст", "дерево", "складка местности", а также с помехой обратного рассеяния, вызванной отражением зондирующего пучка от атмосферного аэрозоля. В связи с этим важно не только обеспечить дальность, на которой должен работать прибор, но и предусмотреть методы селекции цели, которые должны фильтровать помехи.

Существуют различные методы борьбы с типовыми помехами. Наиболее распространенный из них – определение цели по ее порядковому номеру, что упрощает идентификацию объекта оператором в условиях множественных отражений. Для подавления протяженных помех используют анализ характеристик импульса, включая его длительность, что позволяет отделить полезный сигнал от фоновых искажений. Адаптивные алгоритмы позволяют устанавливать динамический порог срабатывания, сохраняя тем самым баланс между ложными срабатываниями и регистрацией слабых сигналов [2]. Однако помехи зачастую неотличимы от реальных целей по форме или амплитуде сигнала, что может привести к ложным срабатываниям. Также в полуавтоматических методах селекции ошибку может вносить субъективность оператора. Поэтому была предложена альтернативная методика обработки данных [3], основанная на выделении областей на эхолокационной трассе с последующей их классификацией. Алгоритм показал свою эффективность в классификации различных объектов при разных погодных условиях. Так как задача классификации цели, до которой проводится измерение, достаточно сложна, отражение сигнала от нее будет зависеть от большого количества параметров (угол, под которым проводится измерение, коэффициент отражения и класс цели, внешние погодные условия). В связи с этим было решено классифицировать типовые помехи, с которыми можно столкнуться при проведении измерений. Разрабатываемый прибор предназначен для вертикального зондирования. При разработке алгоритмов для подобных систем важной задачей является фильтрация часто встречающихся помех типа "атмосферная неоднородность", "дымка", "облако".

Задача обнаружения облаков важна для дальнейшего анализа эхолокационных трасс, алгоритмы широко используются как для спутникового дистанционного зондирования, так и для приборов, анализирующих атмосферу с Земли [4]. Идея с использованием традиционных алгоритмов машинного обучения или глубокого обучения с помощью нейронных сетей [5–10] не нова, но в основном используется анализ изображений, в то время как разработанный алгоритм работает только с эхолокационной трассой. Предложенный подход к обработке данных и уменьшение входных параметров позволяют использовать более простые алгоритмы машинного обучения.

**Классификация облаков.** Сбор данных для обучения моделей осуществлялся на основе стандартной схемы ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) [11]. Структуры разделяют по ярусам и оптической толщине облака. Высота яруса и положение структур нестабильны и зависят от термодинамических условий. На них сильно влияют характеристики облаков, а также влажность воздуха в подоблачном слое. Так, например, основание облаков верхнего яруса в полярных широтах находится на высотах 3...8 км, в умеренных – 6...13 км, а в тропических – 6...18 км [12]. Распределение облаков по ярусам тропосферы отличается значительным разнообразием. Некоторые типы облаков строго привязаны к определенному уровню: например, перистые облака, состоящие из ледяных кристаллов, формируются исключительно в верхнем ярусе. Однако встречаются разновидности облаков, находящихся одновременно в нескольких ярусах, например высокослоистые облака, которые обычно занимают средний ярус, но могут распространяться в верхние слои, создавая многослойные структуры. Так как облако – постоянно меняющаяся во времени структура, которая может находиться на разной высоте, то определить конкретный тип на основе анализа одного отклика, полученного при вертикальном зондировании атмосферы, – сложная задача. При обучении модели был сделан акцент не на типе облака и его параметрах, а на формфакторе, полученном в виде сигнала обратного рассеяния. Это позволяет алгоритму

выполнять селекцию на основе имеющейся у него информации.

Для решения задачи детектирования сигнала обратного рассеяния, полученного при вертикальном зондировании на расстояниях до 18 км, требуется фотоприемное устройство с большой чувствительностью. Диапазон измеряемых дальностей определяется энергетическим потенциалом дальномера с учетом аппаратных ограничений. Дальность действия лазерного дальномера определяется энергетическим потенциалом системы. Уравнение лазерной локации связывает энергию отраженного сигнала с параметрами прибора и среды [13]:

$$E_{\text{det}} > E_{\text{min}} = \frac{E_0 K D_{\text{det}}^2 \tau_a \tau_b}{4R^2}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{det}}$  – энергия отраженного сигнала на чувствительном элементе приемника;  $E_{\text{min}}$  – минимальная чувствительность фотоприемного устройства;  $E_0$  – энергия зондирующего сигнала;  $K$  – коэффициент использования излучения целью;  $D_{\text{det}}$  – диаметр приемного объектива;  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $\tau_b$  – коэффициент пропускания приемной оптики;  $R$  – дальность действия лазерного дальномера.

С помощью (1) минимальная энергия преобразуется в фототок:

$$I_{\text{min}} = \frac{E_{\text{det}}}{t_{\text{pulse}}} \eta, \quad (2)$$

где  $I_{\text{min}}$  – ток фотодиода;  $t_{\text{pulse}}$  – длительность импульса;  $\eta$  – квантовая эффективность фотодиода.

Для решения задачи измерения дальности до 20 км был разработан фотоприемник на основе лавинного фотодиода [14]. Минимальная энергия, необходимая фотоприемнику, зависит от соотношения сигнал/шум (SNR). При проектировании фотоприемника закладывалось  $\text{SNR} = 5$  [15]. Минимальный зарегистрированный сигнал с фотоприемного устройства должен быть больше некоторого порогового напряжения, которое зависит от шума, описываемого формулой

$$V_{\text{noise}} = (I_{\text{noise}} + I_{\text{dark}}) R_{\text{gain}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{noise}}$  – минимальное напряжение шума;  $I_{\text{noise}}$  – интегрированный шум входного тока;  $I_{\text{dark}}$  – темновой ток фотодиода;  $R_{\text{gain}}$  – сопротивление резистора в цепи обратной связи трансимпедансного усилителя.

Воспользовавшись (2) и (3), получили итоговое соотношение для минимального сигнала, которое можно зарегистрировать с помощью разработанного фотоприемного устройства на основе лавинного фотодиода:

$$I_{\text{min}} R_{\text{gain}} > V_{\text{noise}} \text{SNR}.$$

**Алгоритм обработки данных.** Внешний вид экспериментального стенда представлен на рис. 1. Он создан на основе лазерного дальномера НТЕВ.461321.013-01 производства ООО "Квантовая оптика" (Санкт-Петербург, Россия). Стенд состоит из излучателя с длиной волны 1064 нм, приемного канала, включающего в себя фотоприемное устройство на основе лавинного фотодиода, блока питания и управления, а также оптического прицела для точного наведения на объект зондирования. Приемный канал лазерного дальномера оснащен устройством, преобразующим аналоговый сигнал в цифровой с частотой дискретизации 500 МГц, что позволяет получать эхолокационные трассы

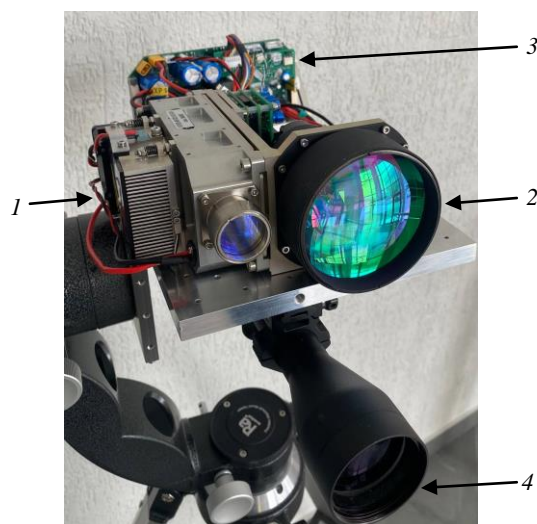


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – излучатель лазерный; 2 – приемный канал; 3 – блок питания; 4 – прицел наведения

Fig. 1. Experimental stand: 1 – laser emitter; 2 – receiving channel; 3 – power supply; 4 – aiming sight

Табл. 1. Технические характеристики стенда  
 Tab. 1. Technical characteristics of the stand

Параметр	Значение
Длина волны, нм	1064
Энергия излучения, мДж	100
Длительность импульсов, нс	$20 \pm 5$
Частота следования импульсов, Гц	20
Расходимость излучения, мрад	0.24
Диаметр выходного излучения, мм	16
Максимальная дистанция, км	24 (при МДВ 20 км)
Точность измерения дистанции, м	1.5

Примечание. МДВ – метеорологическая дальность видимости.

высокого разрешения. Блок питания и управления позволяет настроить параметры работы лазерного излучателя и аналого-цифрового преобразователя. Стенд предназначен для дистанционного зондирования атмосферы и различных объектов лазерным лучом. Параметры стенда приведены в табл. 1.

Зондирование атмосферы выполнялось в течение нескольких дней, охватывая широкий спектр метеорологических условий. Такое разнообразие позволило собрать эхолокационные трассы для различных типов облаков, включая кучевые, слоистые и перистые. Для повышения разнообразия данных в датасет также вошли результаты зондирования объектов, имеющих разную структуру поверхности, например дома, представляющие класс монолитных конструкций, и телевизионные и сотовые вышки, относящиеся к ферменным конструкциям. Лазерное зондирование проводилось из одной точки в разные дни и при разных погодных условиях. После каждого измерения регистрируемая информация сохранялась в цифровом формате и отправлялась на компьютер для последующей обработки. Каждый файл содержал массив значений интенсивности отраженного сигнала с временной меткой, а также сервисные данные о параметрах приемной системы, к которой относятся коэффициенты усиления фотодетектора и частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя. Эти параметры критичны для последующей обработки, так как позволяют корректировать амплитудные искажения и выделять полезный сигнал на фоне помех. Визуализированные данные представлены на рис. 2. На изображении представлена эхолокационная трасса,

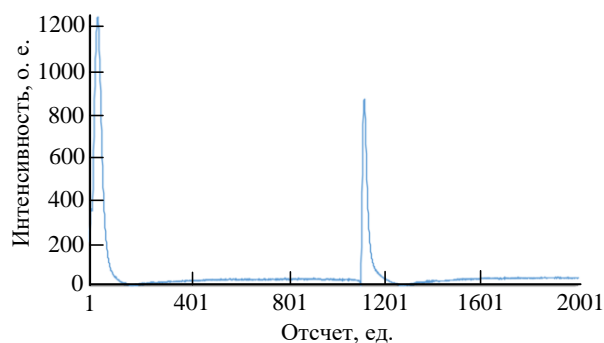


Рис. 2. Визуализированные данные из графика

Fig. 2. Visualized data from the graph

полученная при проведении измерений до объекта, расположенного на расстоянии 350 м, и помеха обратного рассеяния, обусловленная отражением лазерного луча от атмосферного аэрозоля.

При разработке алгоритма учитывалось, что при использовании разных лазеров с разными энергиями излучения и разными по чувствительности приемными каналами интенсивность отраженного сигнала будет разной. Поэтому при обработке данных следует исключить влияние амплитуды сигнала и сохранить только паттерн поведения графика, что делает модель универсальной для разных устройств. В обучающую выборку передаются интенсивности в логарифмическом масштабе выделенных областей, а также информация о параметрах окружающей среды в момент зондирования. На рис. 3 представлена визуализация эхолокационной трассы до и после разметки с выделением областей.

**Экспериментальная часть.** Для решения задачи классификации объектов на эхолокационной трассе был собран датасет, включающий в себя 70 000 измерений, полученных при зондировании реальных объектов. В качестве параметров были записаны дискретные значения нормированной амплитуды сигнала, температура и влажность окружающей среды, а также интеграл, используемый как мера ширины полезного сигнала. Объекты были разделены на классы: облака разных типов, монолитные объекты и ферменные конструкции. Отношение между классами составило 3:1:1. Набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80 и 20 % соответственно.

В данной задаче было решено сравнить эффективность моделей логистической регрессии, случайного леса, градиентного бустинга и

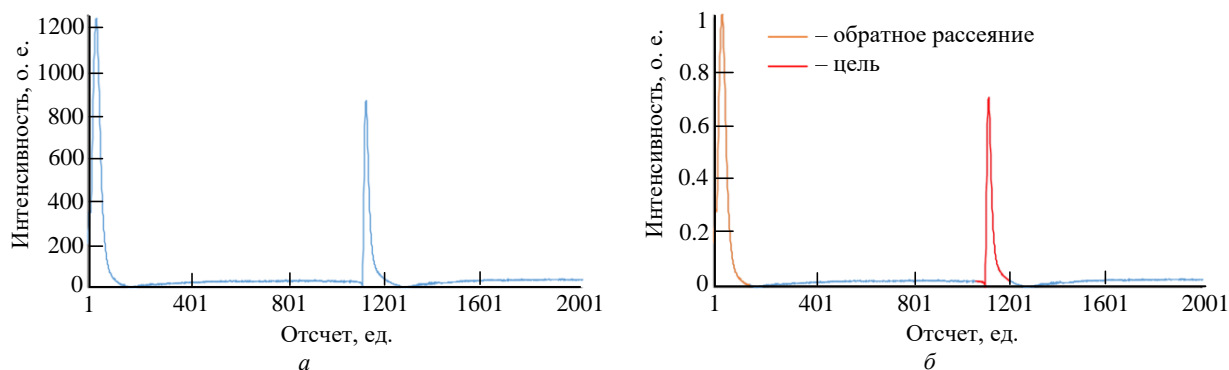


Рис. 3. Схема локационной трассы: *a* – до разметки; *b* – после разметки

Fig. 3. Diagram of the echolocation path: *a* – before marking; *b* – after marking

нейросетевого алгоритма. Модель логистической регрессии была выбрана в силу своей простоты и скорости обучения, однако ее возможности ограничены при описании сложных, нелинейных закономерностей. Данного недостатка лишены модели случайного леса и градиентного бустинга за счет своей устойчивости к выбросам данных. Из существующих архитектур нейронных сетей была выбрана Multi-layer Perceptron (MLP) – сеть, построенная на многослойном прецепторе, подходящая для работы с табличными данными.

Для оценки эффективности обучения моделей были выбраны метрики *точность* (accuracy) и F1-score. Accuracy показывает долю верных предсказаний относительно общего количества и вычисляется по формуле

$$A = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN},$$

где TP – число объектов, которые алгоритм отнес к текущему классу; TN – число объектов, которые алгоритм верно распознал, как не относящиеся к текущему классу; FP – число объектов, которые алгоритм неверно отнес к текущему классу; FN – число объектов, которые алгоритм ошибочно отметил, как не принадлежащие текущему классу.

Accuracy может быть не достаточно информативной метрикой, если в выборке классы не сбалансированы, поэтому дополнительно рассматривается F1-score, представляющая собой среднее гармоническое точности (precision) и полноты (recall). Precision показывает долю правильно предсказанных объектов среди всех, которые алгоритм отнес к текущему классу:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (4)$$

Recall – показывает долю правильно предсказанных алгоритмом объектов среди всех объектов, принадлежащих к текущему классу:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (5)$$

F1-score используется при необходимости оценки качества положительных предсказаний и способности модели обнаружить объекты целевого класса. Используя (4) и (5), получим:

$$\text{F1-score} = 2 \frac{\text{Recall} \cdot \text{Precision}}{\text{Recall} + \text{Precision}}.$$

Обучение моделей производилось на персональном компьютере с процессором AMD Ryzen 7 3700x и оперативной памятью 32 Гбайт DDR4. Результаты сравнения оценки качества представлены в табл. 2.

Сравнение моделей машинного обучения выявило, что модель градиентного бустинга показала сопоставимый результат с нейросетевым алгоритмом на используемом наборе данных, что позволяет применять его для снижения вычислительных затрат без потери качества предсказания.

Табл. 2. Сравнение метрик оценки качества обучения для разных моделей при решении задачи классификации

Tab. 2. Comparison of learning quality assessment metrics for different models when solving the classification problem

Модель	Accuracy	F1-score
Логистическая регрессия	0.67	0.45
Случайный лес	0.82	0.78
Градиентный бустинг	0.89	0.89
Нейросетевая модель (MLP)	0.93	0.90

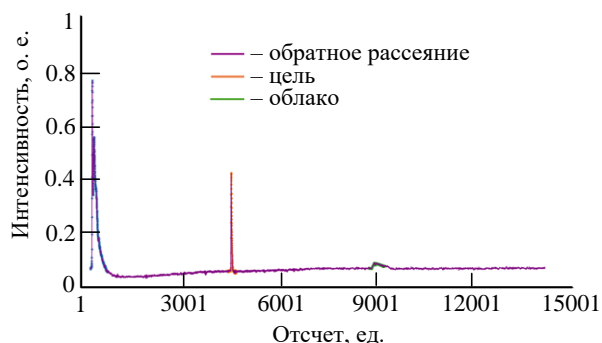


Рис. 4. Результат работы обученной модели

Fig. 4. Results obtained by the trained model

Для проверки эффективности обученной модели градиентного бустинга на реальных данных были получены эхолокационные трассы, где цель является малоразмерной, т. е. угловые размеры объекта не превышают рабочего поля дальномера, которое образуется диаграммой направленности лазерного пучка и угловым полем зрения приемного канала. В качестве объекта был выбран угол дома, расположенного на расстоянии 1100 м, на фоне которого виднелись облака. Задачей обученной модели было выделить области на графике и классифицировать их. Результат работы обученной модели представлен на рис. 4.

Из рисунка видно, что алгоритм предобработки корректно выделил области и привел в нужный для работы модели формат, а модель приняла верное решение по классификации помехи обратного рассеяния и облака, находящегося за целью.

**Заключение.** Исследование подтвердило, что комбинация предобработки данных и градиентного бустинга позволяет достичь высокой точности в классификации объектов на фоне облаков. Это существенно повышает надежность лазерных дальномеров в условиях реальных атмосферных помех. Модель градиентного бустинга

продемонстрировала схожий результат с нейросетевым алгоритмом, что позволяет использовать менее производительные вычислители без потери качества предсказания. Практическая значимость работы заключается в разработке универсального метода, работающего с сигналами, а не изображениями, что снижает вычислительную нагрузку и расширяет область применения – от наземных измерительных систем до спутникового мониторинга. Экспериментальный стенд на основе лавинного фотодиода обеспечил регистрацию сигналов на необходимой дистанции, а предобработка данных (фильтрация шумов, логарифмирование интенсивностей) позволила абстрагироваться от амплитудных характеристик оборудования. Несмотря на успех градиентного бустинга, другие методы, такие, как случайный лес и логистическая регрессия, также показали потенциал: первый – в условиях ограниченных ресурсов, вторая – для анализа линейно разделимых классов. Однако их точность оказалась существенно ниже, что подчеркивает важность выбора алгоритма под конкретные задачи. Перспективным направлением развития является интеграция методов глубокого обучения для анализа временных зависимостей в сигналах, а также расширение датасета за счет данных из различных климатических зон. Результаты исследования открывают возможности для повышения надежности лазерных дальномеров в геодезии, экологическом мониторинге и системах навигации, где точное выделение целей на фоне атмосферных помех остается критически важной задачей.

Дальнейшее развитие данного метода связано с интеграцией модели в вычислительное устройство для возможности фильтрации помех в режиме реального времени.

### Список литературы

1. Methods of Precise Distance Measurements for Laser Rangefinders with Digital Acquisition of Signals / M. Muzal, M. Zygmunt, P. Knysak, T. Drozd, M. Jakubaszek // Sensors. 2021. Vol. 21, iss. 19. Art. № 6426. doi: 10.3390/s21196426

2. Достоверность измерений импульсного лазерного дальномера / В. Вильнер, В. Волобуев, А. Ларюшин, А. Рябокуль // Фотоника. 2013. № 3. С. 42–60.

3. Писарев И. С., Ухов А. А. Классификация целей на основе анализа лазерного излучения с использованием новой методики разметки графиков //

80-я Науч.-техн. конф. Санкт-Петерб. НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург, 2025. С. 32–35.

4. The Evolution of Meteorological Satellite Cloud-Detection Methodologies for Atmospheric Parameter Retrievals / F. Romano, D. Cimini, F. Di Paola, D. Gallucci, S. Larosa, S. T. Nilo, E. Ricciardelli, B. D. Isager, K. Hutchison // Remote Sens. 2024. Vol. 16, iss. 14. Art. № 2578. doi: 10.3390/rs16142578

5. A Review of Machine Learning and Deep Learning for Object Detection, Semantic Segmentation, and Human

Action Recognition in Machine and Robotic Vision / N. Manakitsa, G. S. Maraslidis, L. Moysis, G. F. Fragulis // Technologies. 2024. Vol. 12, iss. 2. Art. № 15.

doi: 10.3390/technologies12020015

6. Pinto A. M., Rocha L. F., Moreira A. P. Object recognition using laser range finder and machine learning techniques // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2013. Vol. 29, iss. 1. P. 12–22.

doi: 10.1016/j.rcim.2012.06.002

7. Optimized Interference Suppression for TCSPC LiDAR / S. Grollius, S. Grosse, M. Ligges, A. Grabmaier // IEEE Sensors J. 2022. Vol. 22, № 24. P. 24094–24101.

doi: 10.1109/JSEN.2022.3216810

8. Reguiegue M., Chouireb F. Automatic day time cloud detection over land and sea from MSG SEVIRI images using three features and two artificial intelligence approaches // Signal, Image and Video Processing. 2018. Vol. 12. P. 189–196.

doi: 10.1007/s11760-017-1145-0

9. Direct TOF Scanning LiDAR Sensor With Two-Step Multievent Histogramming TDC and Embedded Interference Filter / H. Seo, H. Yoon, D. Kim, J. Kim, S.-J. Kim, J.-H. Chun // IEEE J. of Solid-State Circuits. 2021. Vol. 56, № 4. P. 1022–1035.

doi: 10.1109/JSSC.2020.3048074

10. Kurihana T., Moyer E. J., Foster I. T. AICCA: AI-Driven Cloud Classification Atlas // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 22. Art. № 5690.

doi: 10.3390/rs14225690

11. Rossow W. B., Schiffer R. A. ISCCP cloud data products // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1991. Vol. 71. P. 2–20.

12. Рыбакова Ж. В. Облака и их трансформация / науч. ред. И. В. Кужевская. Томск: Изд. Дом Томского гос. ун-та, 2020. 234 с.

13. Вильнер В. Г., Ларюшин А. И., Рябокуль А. С. Оптико-электронные высотометры-скоростемеры на основе полупроводниковых лазеров для БПЛА // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 5–6. С. 127–133.

doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-5-6-127-133

14. Pisarev S., Uhov A. A. Development of a Photo-detector Device Based on an Avalanche Photodiode with a Thermal Compensation System // IEEE 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering, Novosibirsk, Russia, 15–17 Nov. 2024. IEEE, 2024. P. 560–563.

doi: 10.1109/PIERE62470.2024.10804907

15. Differential optical-path approach to improve signal-to-noise ratio of pulsed-laser range finding / Qun Hao, Jie Cao, Yao Hu, Yunyi Yang, Kun Li, Tengfei Li // Optics Express. 2014. Vol. 22, iss. 1. P. 563–575.

doi: 10.1364/OE.22.000563

## Информация об авторах

**Писарев Илья Сергеевич** – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2023, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов: цифровая обработка сигналов; дальнометрия; машинное обучение.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: ilya.pisarev91@gmail.com

**Ухов Андрей Александрович** – доктор технических наук (2015), доцент (2001), профессор кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 152 научных работ. Сфера научных интересов: спектрометрия, цифровая обработка сигналов, дальнометрия.

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

<https://orcid.org/0000-0002-3744-0777>

## References

1. Muzal M., Zygmunt M., Knysak P., Drozd T., Jakubaszek M. Methods of Precise Distance Measurements for Laser Rangefinders with Digital Acquisition of Signals. Sensors. 2021, vol. 21, iss. 19, art. no. 6426. doi: 10.3390/s21196426

2. Vilner V., Volobuev V., Laryushin A., Ryabokul A. Accuracy of Measurements of the Pulse Laser Rangefinder. Photonics. 2013, no. 3, pp. 42–60. (In Russ.)

3. Pisarev I. S., Uhov A. A. Klassifikatsiya tselei na osnove analiza lazernogo izlucheniya s ispol'zovaniem novoi metodiki razmetki grafikov [Classification of Targets Based on Laser Radiation Analysis Using a New Graph Marking Technique]. The 80<sup>th</sup> Scientific and Tech-

nical Conf. of the St Petersburg NTO RES named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day: collection of reports. SPbSETU. Saint Petersburg, 2025, p. 32–35. (In Russ.)

4. Romano F., Cimini D., Di Paola F., Gallucci D., Larosa S., Nilo S. T., Ricciardelli E., Iisager B. D., Hutchinson K. The Evolution of Meteorological Satellite Cloud-Detection Methodologies for Atmospheric Parameter Retrievals. Remote Sens. 2024, vol. 16, iss. 14, art. no. 2578. doi: 10.3390/rs16142578

5. Manakitsa N., Maraslidis G. S., Moysis L., Fragulis G. F. A Review of Machine Learning and Deep Learning for Object Detection, Semantic Segmentation, and Human Action Recognition in Machine and Robotic

Visiono Technologies. 2024, vol. 12, iss. 2, art. no. 15.  
doi: 10.3390/technologies12020015

6. Pinto A. M., Rocha L. F., Moreira A. P. Object Recognition Using Laser Range Finder and Machine Learning Techniques. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2013, vol. 29, iss. 1, pp. 12–22.  
doi: 10.1016/j.rcim.2012.06.002

7. Grollius S., Grosse S., Ligges M., Grabmaier A. Optimized Interference Suppression for TCSPC LiDAR. *IEEE Sensors J.* 2022, vol. 22, no. 24, pp. 24094–24101.  
doi: 10.1109/JSEN.2022.3216810

8. Reguiegue M., Chouireb F. Automatic day Time Cloud Detection Over Land and Sea from MSG SEVIRI Images Using Three Features and Two Artificial Intelligence Approaches. *Signal, Image and Video Processing*. 2018, vol. 12, pp. 189–196.  
doi: 10.1007/s11760-017-1145-0

9. Seo H., Yoon H., Kim D., Kim J., Kim S.-J., Chun J.-H. Direct TOF Scanning LiDAR Sensor With Two-Step Multievent Histogramming TDC and Embedded Interference Filter. *IEEE J. of Solid-State Circuits*. 2021, vol. 56, no. 4, pp. 1022–1035.  
doi: 10.1109/JSSC.2020.3048074

10. Kurihana T., Moyer E. J., Foster I. T. AICCA: AI-Driven Cloud Classification Atlas. *Remote Sensing*. 2022, vol. 14, iss. 22, art. no. 5690.  
doi: 10.3390/rs14225690

doi: 10.3390/rs14225690

11. Rossow W. B., Schiffer R. A. ISCCP Cloud Data Products. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1991, vol. 71, pp. 2–20.

12. Rybakova G. V. *Oblaka i ikh transformatsiya* [Clouds and Their Transformation]. Ed by I. V. Kuzhevskaya. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University, 2020, 234 p. (In Russ.)

13. Vilner V., Laryushin A., Ryabokul A. Optoelectronic Altimeter-Speed Meters Based on Semiconductor Lasers for UAVs. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015, no. 5–6, pp. 127–133.  
doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-5-6-127-133

14. Pisarev S., Uhov A. A. Development of a Photodetector Device Based on an Avalanche Photodiode with a Thermal Compensation System. *IEEE 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering*, Novosibirsk, Russia, 15–17 Nov. 2024. *IEEE*, 2024, pp. 560–563.  
doi: 10.1109/PIERE62470.2024.10804907

15. Qun Hao, Jie Cao, Yao Hu, Yunyi Yang, Kun Li, Tengfei Li. Differential Optical-Path Approach to Improve Signal-to-Noise Ratio of Pulsed-Laser Range Finding. *Optics Express*. 2014, vol. 22, iss. 1, pp. 563–575.  
doi: 10.1364/OE.22.000563

#### **Information about the authors**

**Ilya S. Pisarev**, Master's degree in Electronics and Nanoelectronics (2023, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Electronic Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; rangefinder; machine learning. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: ilya.pisarev91@gmail.com

**Andrey A. Uhov**, Dr Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor (2001), Professor of the Department of Electronic Devices of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 152 scientific publications. Area of expertise: spectrometry; digital signal processing; rangefinder. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: aauhov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-3744-0777>

---

## Компактный двухполяризационный сверхширокополосный кардиоидный излучатель с согласующими вставками

Р. Э. Косак<sup>✉</sup>, А. В. Геворкян

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

<sup>✉</sup> kosak@sfedu.ru

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время наблюдается тенденция к миниатюризации печатных излучателей фазированных антенных решеток. При этом довольно часто от таких излучателей требуется работа в сверхширокой полосе (СШП) частот, возможность широкоугольного сканирования, а также работа на двух поляризациях. Для улучшения качества характеристик печатных излучателей иногда используются согласующие вставки определенного размера и формы.

**Цель работы.** Увеличение значения коэффициента перекрытия излучателя с сохранением СШП, широкоугольности сканирования в секторе углов  $\pm 60^\circ$ , ограниченного рассогласованием, и электрической компактности с высотой, значение которой не превышает  $\lambda$  на верхней рабочей частоте, благодаря использованию различных согласующих металлических вставок.

**Материалы и методы.** Электродинамическое моделирование излучателя выполнено в составе бесконечной антенной решетки в системе автоматизированного проектирования Ansys HFSS.

**Результаты.** Использование металлических прямоугольных вставок размером  $25.5 \times 145.0$  мм на краях излучателя позволяет расширить его рабочую полосу частот, а использование дополнительной вставки в расширяющейся щели позволяет улучшить его согласование (излучатель с комбинированными вставками). Рабочая полоса частот исходного излучателя по уровню коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН)  $\leq 3$  располагается в диапазоне от 257.6 до 732.5 МГц, чему соответствует коэффициент перекрытия 2.844. Рабочая полоса частот излучателя с комбинированными вставками по тому же уровню КСВН располагается в диапазоне от 164.9 до 677.5 МГц, чему соответствует коэффициент перекрытия 4.109. Электрический размер предложенного излучателя на верхней рабочей частоте 677.5 МГц составляет  $0.339\lambda \times 0.339\lambda \times 0.678\lambda$ , а на нижней 164.9 МГц –  $0.083\lambda \times 0.083\lambda \times 0.165\lambda$ .

**Заключение.** Благодаря использованию комбинированных вставок удалось увеличить значение коэффициента перекрытия излучателя с сохранением СШП, широкоугольности сканирования в секторе углов  $\pm 60^\circ$  и электрической компактности. Предложенный излучатель может использоваться в составе фазированных антенных решеток для систем радиосвязи, радиолокации и радионавигации.

**Ключевые слова:** двухполяризационный излучатель, кардиоидный излучатель, КСВН, коэффициент усиления, сверхширокая полоса частот, согласующие вставки, уровень кроссовой поляризации, широкий сектор углов сканирования

**Для цитирования:** Косак Р. Э., Геворкян А. В. Компактный двухполяризационный сверхширокополосный кардиоидный излучатель с согласующими вставками // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 39–48. doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-39-48

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

**Источник финансирования.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00537-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/> в Центре коллективного пользования "Прикладная электродинамика и антенные измерения" Южного федерального университета, Таганрог.

Статья поступила в редакцию 16.08.2025; принята к публикации после рецензирования 10.12.2025; опубликована онлайн 30.04.2026



## Compact Dual-Polarized Ultra-Wideband Cardioid Radiator with Matching Inserts

Roman E. Kosak✉, Armen V. Gevorkyan

Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉ kosak@sfnu.ru

### Abstract

**Introduction.** In recent years, there has been a growing trend toward the miniaturization of printed radiators for phased arrays. At the same time, such radiators are frequently required to operate over an ultra-wide bandwidth, support wide-angle scanning, and enable dual polarization. To enhance the performance of printed radiators, matching inserts with specific geometries and dimensions can be used.

**Aim.** To increase the overlap ratio of a printed radiator while maintaining its ultra-wideband performance and wide-angle scanning within an angular sector of  $\pm 60^\circ$ , limited by the mismatch, and ensuring electrical compactness with a height not exceeding  $\lambda$  at the upper operating frequency through the use of various matching metal inserts.

**Materials and methods.** Electrodynamics simulation of the radiator was performed as part of an infinite antenna array using the Ansys HFSS computer-aided design software.

**Results.** The use of metal rectangular inserts measuring  $25.5 \times 145.0$  mm at the edges of the radiator allowed its operating frequency band to be extended, while the use of an additional insert in the aperture allowed its matching (radiator with combined inserts) to be improved. The operating frequency band of the original radiator, at a voltage standing wave ratio (VSWR) of  $\leq 3$ , extends from 257.6 to 732.5 MHz, corresponding to an overlap ratio of 2.844. For the radiator with combined inserts, the operating band at the same VSWR level ranges from 164.9 to 677.5 MHz, yielding an overlap ratio of 4.109. The electrical dimensions of the proposed radiator are  $0.339\lambda \times 0.339\lambda \times 0.678\lambda$  at the upper operating frequency of 677.5 MHz, and  $0.083\lambda \times 0.083\lambda \times 0.165\lambda$  at the lower frequency of 164.9 MHz.

**Conclusion.** The application of combined inserts in the radiator allows its overlap ratio to be increased at the same time as maintaining its ultra-wideband performance, wide-angle scanning in the sector of angles up to  $\pm 60^\circ$ , and compact dimensions. The proposed radiator can be used in phased arrays for radio communication, radar and radio navigation systems.

**Keywords:** dual-polarization radiator, cardioid radiator, VSWR, realized gain, ultra-wide frequency band, matching inserts, cross-polarization level, wide-angle scanning sector

**For citation:** Kosak R. E., Gevorkyan A. V. Compact Dual-Polarized Ultra-Wideband Cardioid Radiator with Matching Inserts. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 39–48.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-39-48

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

**Source of funding.** This research was financially supported by Russian Science Foundation (project №22-19-00537-P, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00537/>).

Submitted 16.08.2025; accepted 10.12.2025; published online 30.04.2026

**Введение.** Фазированные антенные решетки (ФАР) находят широкое применение в спутниковых системах связи и навигации [1], в составе радиолокационных станций различного назначения [2], системах связи пятого поколения [3] и системах радиоэлектронной борьбы. Широкая сфера применения ФАР обусловлена возможностью электрического сканирования пространства, что обеспечивает оптимальную скорость обзора и увеличивает срок службы системы [4]. Большинство ФАР способны сканировать с заданными характе-

ристиками излучения в одной плоскости из-за характерных для этого способа более низких потерь и стоимости. В этом случае сканирование во второй плоскости обеспечивается механическим вращением решетки [5, 6]. При этом непростой задачей является обеспечение сканирования с приемлемыми характеристиками в обеих плоскостях.

Довольно часто к ФАР предъявляются требования возможности работы в сверхширокой полосе частот, широкоугольного сканирования и работы на двух ортогональных поляризациях.

Итоговая масса решетки и ее стоимость также играют немаловажную роль. Всем этим требованиям могут удовлетворить излучатели на основе антенны Вивальди, впервые представленной П. Гибсоном в 1979 г. [7]. Форма антенны напомнила ему скрипку, вследствие чего он назвал свою разработку именем любимого скрипичного композитора XVII–XVIII вв. – А. Вивальди. Ширина рабочей полосы частот такой антенны теоретически не ограничена, однако на практике она определяется размером питающей линии, а также конструкцией самой антенны [8].

Итак, характеристики излучения таких антенн и излучателей на их основе в основном определяются конструктивными особенностями антенн. В частности, значительную роль играет форма кромки. В литературе рассмотрены различные формы кромки антенн Вивальди: эллиптическая, круглая, чебышевская и др. Наиболее распространена эллиптическая форма вследствие простоты ее проектирования и реализации, однако она приводит к увеличению размера антенны. Дальнейшее скругление кромки позволяет обеспечить одинаковую диаграмму направленности в плоскостях  $E$  и  $H$ , а также улучшить согласование и расширить рабочую полосу частот. Другие формы кромки обычно усложняют конструкцию и процесс изготовления антенны [8].

Известны различные методы повышения компактности антиподных антенн и излучателей, позволяющие сохранять приемлемые характеристики: использование различных диэлектрических подложек, вырезов и вставок, разъемов питания. Более того, эти характеристики могут быть улучшены гофрированием кромки, использованием диэлектрической линзы или различных согласующих устройств или метаматериалов. Таким образом, изменение геометрии антенны приводит к изменению таких ее параметров, как размер, усиление, согласование, диаграмма направленности, поляризация и рабочий диапазон частот.

К ФАР может предъявляться требование компактности (уменьшенные размеры) излучателей. Основная цель уменьшения размера – обеспечить ее совместимость с современными промышленными требованиями и легкость интеграции с другими схемами, что приведет к созданию экономически эффективной системы

беспроводной связи с меньшим энергопотреблением [9]. Электрический размер излучателя ФАР измеряется в рабочих длинах волн. Он показывает количество длин волн, укладываемых в геометрическом размере антенны [10]. Компактными будем считать излучатели ФАР, электрическая высота которых меньше длины волны на верхней рабочей частоте.

Известны различные конструкции двухполяризованных излучателей на основе антенны Вивальди, которые являются сверхширокополосными (СШП) по уровню коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН)  $\leq 3$ , однако имеют недостаточно широкий сектор углов сканирования [11, 12] или их электрические размеры не позволяют говорить о компактности [13]. Так, в [11] представлен СШП-излучатель на основе антенны Вивальди, который может найти применение в системах связи и радиолокации. Предложенный излучатель имеет небольшое значение коэффициента перекрытия 2.792 и сектор углов сканирования  $\pm 30^\circ$  в  $E$ - и  $H$ -плоскостях при электрической высоте  $0.491 \lambda$  на верхней рабочей частоте 3.4 ГГц. Излучатель с коэффициентом перекрытия 5.143 и сектором углов сканирования  $\pm 40^\circ$  в  $E$ - и  $H$ -плоскостях при электрической высоте  $0.576 \lambda$  на верхней рабочей частоте 1.8 ГГц рассмотрен в [12]. В [13] предложен излучатель с коэффициентом перекрытия 5.667, при этом сектор углов сканирования равен  $\pm 50^\circ$  в  $E$ - и  $H$ -плоскостях, а электрическая высота на верхней рабочей частоте 13.6 ГГц составляет  $1.377 \lambda$ .

Из рассмотренных работ видно, что довольно сложно создать компактный излучатель ФАР на основе антенны Вивальди, имеющий хорошие характеристики в СШП в режиме широкоугольного сканирования. Количество исследований по этой тематике свидетельствует об актуальности и высоком интересе к такой разработке в последнее время.

Целью описываемой работы являлось увеличение значения коэффициента перекрытия излучателя с сохранением сверхширокополосности, широкоугольности сканирования в секторе углов  $\pm 60^\circ$ , ограниченного рассогласованием, и электрической компактности с высотой, значение которой не превышает  $\lambda$  на верхней рабочей частоте, благодаря использованию различных металлических согласующих вставок.

**Материалы и методы.** Существует множество методов, позволяющих сделать антиподный излучатель более компактным с сохранением характеристик излучения на приемлемом уровне: выбор материала подложки и формы лепестков излучателя, использование импедансных вставок [8]. На характеристики излучателя существенно влияют толщина диэлектрической подложки и диэлектрическая проницаемость материала. Направление максимума излучения электромагнитного поля такой антенны совпадает с вектором распространения электромагнитной волны, вдоль которого выполняется расширяющаяся щель. Существует много различных диэлектрических материалов для создания печатных антенн и излучателей. Желательна подложка с низким тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  и низкой относительной диэлектрической проницаемостью [8]. Низкий  $\text{tg } \delta$  означает низкие потери мощности, что необходимо для работы антенн. В описываемой работе в качестве подложки выбран материал Rogers RT/Duroid 5880 толщиной 0.9 мм с относительной диэлектрической проницаемостью 2.2 и  $\text{tg } \delta = 0.0009$ .

Одна из основных проблем при конструировании излучателей ФАР – минимизация коэффициента отражения (улучшение КСВН) в рабочей полосе частот в заданном секторе углов сканирования. В качестве метода избран метод электродинамического моделирования. Он применим для различных излучателей, в том числе печатных и щелевых с различными способами возбуждения, к которым относят и излучатели на основе антенны Вивальди. Различают согласование излучателей ФАР для одного направления луча и в секторе углов сканирования.

В настоящее время широкое распространение получила программа электродинамического моделирования Ansys HFSS, которая предназначена для анализа трехмерных СВЧ-структур. Перед решением электродинамической задачи необходимо начертить модель анализируемого устройства, задать материалы для каждого элемента объекта, а также указать порты и граничные условия на поверхностях. Затем Ansys HFSS рассчитает электромагнитное поле исследуемой структуры и найдет по этим данным  $S$ -параметры и другие характеристики. Электродинамическое моделирование в Ansys

HFSS в описываемой работе основано на использовании метода конечных элементов [14].

ФАР, содержащие большое количество излучающих печатных элементов, поддаются анализу на основе ряда Флоке для периодических ячеек [5]. В качестве модели многоэлементной ФАР удобно использовать периодическую структуру, которая получается при продолжении реальной антенной решетки до бесконечности с сохранением периодичности расположения излучателей. Именно такая модель и называется бесконечной антенной решеткой. Она лучше всего описывает конечную антенную решетку с пассивными, нагруженными на согласованные нагрузки излучателями на периферии, используемыми для уменьшения заднего излучения и краевого эффекта. Использование бесконечной антенной решетки позволяет решить граничную задачу электродинамики только для одного периода антенной решетки и существенно сократить объем вычислений [6].

Итак, анализ бесконечной ФАР сводится к электродинамическому расчету одной из ее ячеек в силу теоремы Флоке. На вертикальных противоположащих поверхностях параллелепипеда ячейки ФАР в САПР Ansys HFSS задаются периоди-

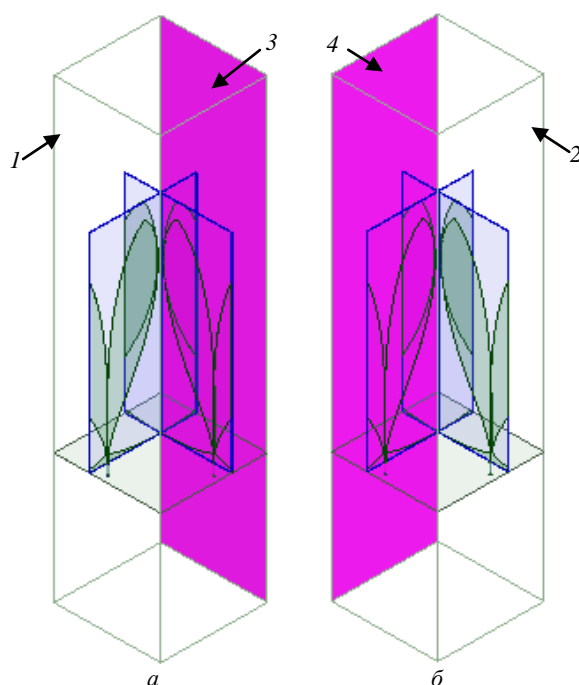


Рис. 1. Периодические граничные условия Master –Slave:  $a$  – Master (1), Slave (3);  $b$  – Master (2), Slave (4)

Fig. 1. Periodic boundary Master –Slave conditions:  $a$  – Master (1), Slave (3);  $b$  – Master (2), Slave (4)

ческие граничные условия типа Master (1, 2) – Slave (3, 4), как указано на рис. 1, а, б.

**Конструкции кардиоидных излучателей.** Исходная конструкция описываемого в статье компактного двухполяризованного СШП кардиоидного излучателя (рис. 2, а) разработана на основе излучателя линейной поляризации из [15]. Изменился размер экрана – теперь он составляет 150×150 мм. Такой излучатель является антиподным – лепестки, образующие расширяющуюся щель, расположены с двух сторон диэлектрической подложки. Для построения кромки излучателя используется следующая формула кардиоиды:

$$\begin{cases} x(t) = 0; \\ y(t) = \frac{0.5}{7} \cos t; \\ z(t) = \frac{1}{9} (\sin t + \sqrt{|\cos t|}), \end{cases}$$

где  $t$  изменяется от 0 до  $2\pi$  с шагом  $2\pi/1000$ .

В описываемой работе рассмотрено влияние металлических прямоугольных вставок (рис. 2, б), которые соединены с лепестками излучателя, так как определено, что в зависимости от их размера удастся расширить рабочую полосу частот [15] и улучшить согласование [16]. Также рассмотрен излучатель с комбинирован-

ными вставками (рис. 2, в), что может улучшить характеристики излучения при сканировании [17]. В соответствии с рис. 2, а для входа 1  $E$ -плоскость излучателя находится в плоскости  $YOZ$ ,  $H$ -плоскость –  $XOZ$ , а для входа 2 – наоборот.

Расширяющаяся щель излучателей выполнена по формуле эллипса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где  $a = 198.17$  мм,  $b = 57.57$  мм.

**Характеристики излучения исходной конструкции кардиоидного излучателя.** На рис. 3 представлены частотные характеристики КСВН при сканировании в  $E$ - (а) и  $H$ -плоскостях (б), коэффициента усиления КУ (в), уровня кросс-поляризации (г), коэффициента передачи (д) и коэффициента полезного действия КПД (е) исходной конструкции излучателя. Здесь и далее каждому типу кривой соответствует свое значение угла сканирования:  $0^\circ$  (—),  $15^\circ$  (---),  $30^\circ$  (- - -),  $45^\circ$  (.....) и  $60^\circ$  (— — —). Необходимо отметить, что приводится только по одному графику КУ, уровня кроссполяризации и КПД, так как они почти не различаются при сканировании в  $E$ - и  $H$ -плоскостях.

Согласно рис. 3, а, б рабочая полоса частот исходной конструкции излучателя по уровню

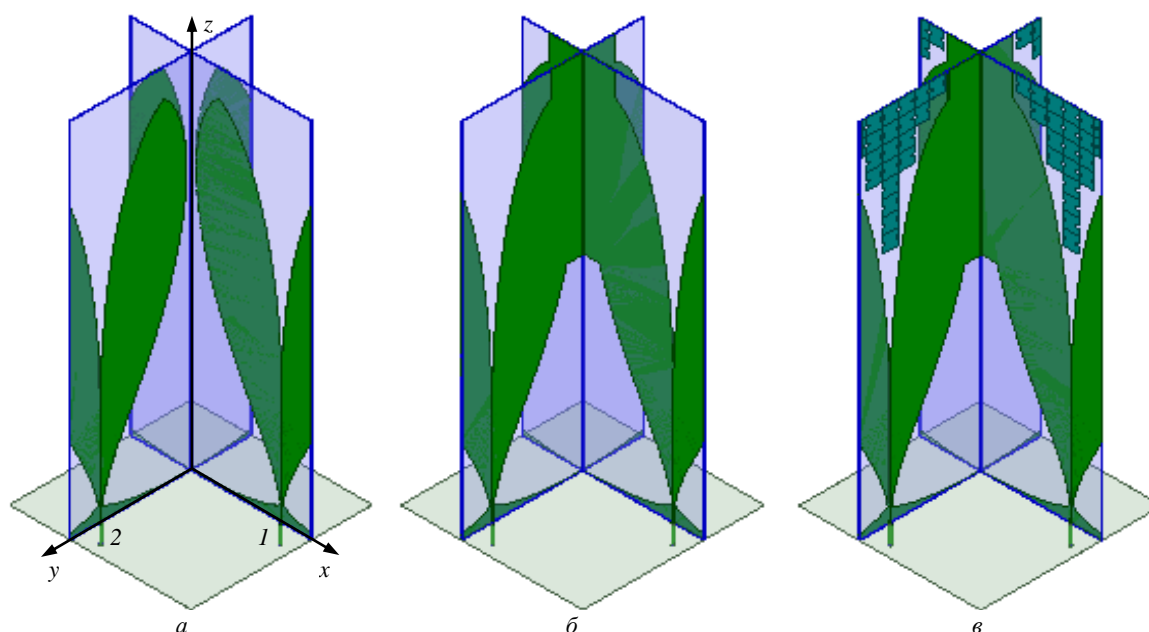


Рис. 2. Конструктивная форма: а – исходной конструкции излучателя; б – с прямоугольными вставками; в – с комбинированными вставками

Fig. 2. Design of: а – the original radiator; б – with rectangular inserts; в – with combined inserts

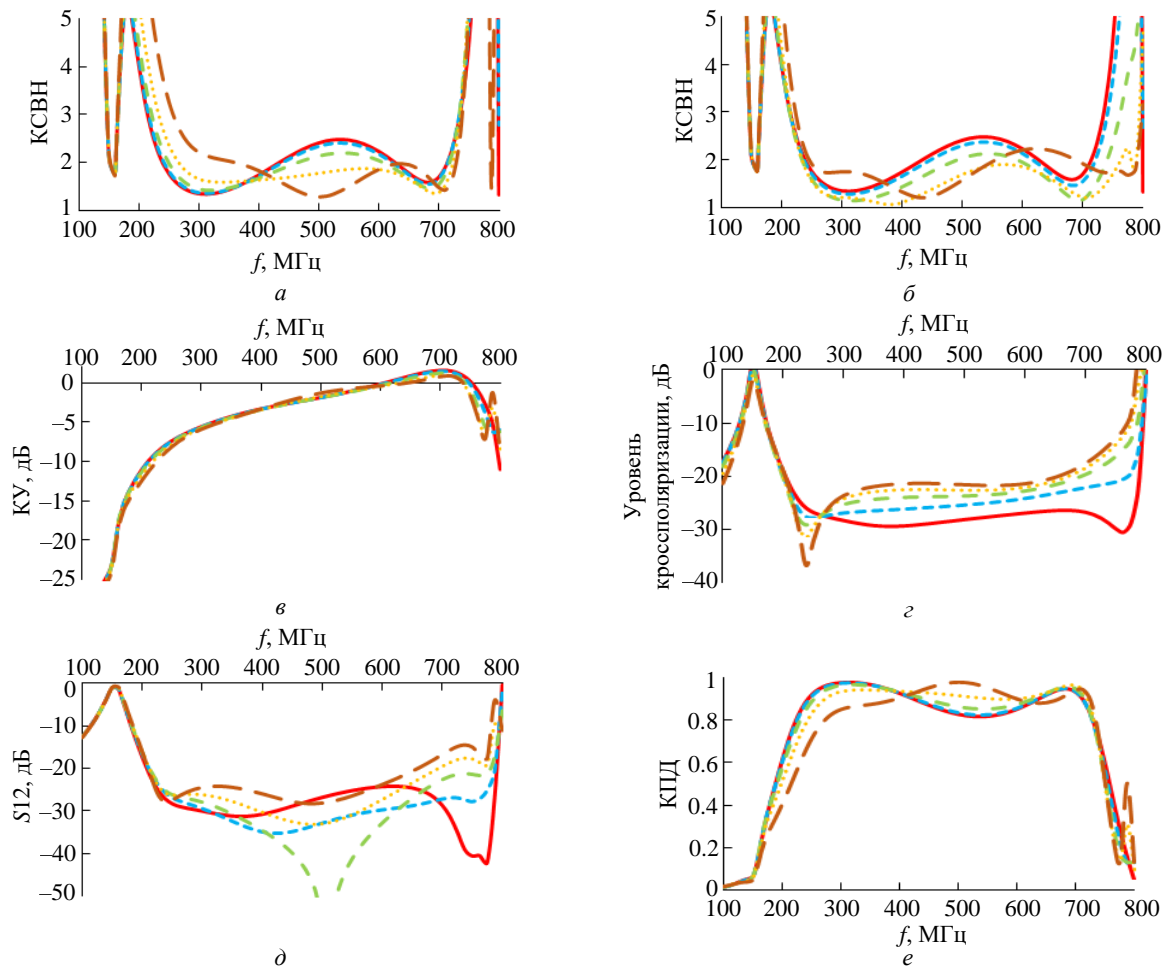


Рис. 3. Частотная характеристика: а, б – КСВН при сканировании в  $E$ - и  $H$ -плоскостях; в – КУ; г – уровни кроссполяризации; д – коэффициента передачи; е – КПД исходной конструкции излучателя  
 Fig. 3. Frequency characteristics of: а, б – VSWR in the scanning mode in the  $E$ - and  $H$ -plane; в – realized gain; г – crosspolarization level; д – transmission coefficient; е – efficiency of the original radiator

КСВН  $\leq 3$  располагается в диапазоне от 257.6 до 732.5 МГц при сканировании в секторе углов  $\pm 60^\circ$  в  $E$ - и  $H$ -плоскостях, чему соответствует значение коэффициента перекрытия 2.844. Из рис. 3, в следует, что в рабочей полосе частот КУ располагается в диапазоне от  $-7.7$  до 1.6 дБ. Значение уровня кроссполяризации не превышает  $-14$  дБ, причем в основной части рабочего диапазона оно ниже  $-21$  дБ, как видно из рис. 3, г. Согласно рис. 3, д, е значение коэффициента передачи в основном располагается ниже уровня  $-23$  дБ, а КПД превышает значение 0.81.

**Характеристики излучения конструкций кардиоидного излучателя с прямоугольными и комбинированными вставками.** Рассмотрено влияние металлических прямоугольных вставок разного размера на характеристики излучения. Определено, что оптимальное значение размера вставок составляет  $25.5 \times 145.0$  мм. На рис. 4

представлены частотные характеристики КСВН излучателя с металлическими прямоугольными вставками при сканировании в секторе углов  $\pm 60^\circ$  в  $E$ - (а) и  $H$ -плоскостях (б).

Согласно рис. 4, а, б рабочая полоса частот излучателя с металлическими прямоугольными вставками по уровню КСВН  $\leq 3$  располагается в диапазоне от 295.1 до 693.4 МГц при сканировании в секторе углов  $\pm 60^\circ$  в  $E$ - и  $H$ -плоскостях, чему соответствует значение коэффициента перекрытия 2.350. Видно, что рабочая полоса сместилась вниз по оси частот, а среднее значение КСВН при работе в  $E$ -плоскости уменьшилось. При этом возник пик КСВН при угле сканирования  $60^\circ$  в полосе частот 220...300 МГц, превышающий уровень КСВН = 3, вследствие чего итоговая рабочая полоса частот при сканировании в секторе углов  $\pm 60^\circ$  сужается. Из [17] следует, что такой пик можно уменьшить благодаря

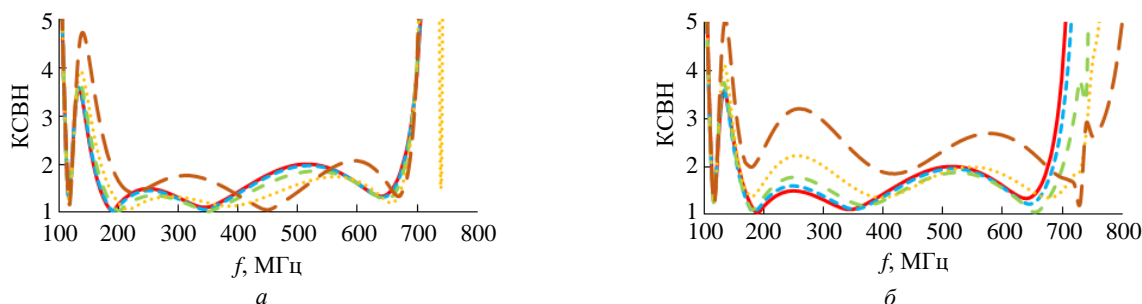


Рис. 4. Частотная характеристика КСВН излучателя с прямоугольными вставками при сканировании в  $E$ - (а) и  $H$ -плоскостях (б)  
 Fig. 4. Frequency characteristics of VSWR of the radiator with rectangular inserts in the scanning mode in the  $E$ - (a) and  $H$ -plane (b)

дополнительному использованию импедансных вставок в расширяющейся щели.

Рассмотрено влияние комбинированной вставки, состоящей из металлических прямоугольных вставок и вставки в расширяющейся щели кардиоидного излучателя. Установлено, что ее оптимальный размер определяется совокупностью 22 плотно прилегающих друг к другу металлических элементов без зазора размером

13×13 мм с вырезами размером 2×2 мм, размещаемых на стороне металлических слоев, подключенных к жиле коаксиального кабеля. На рис. 5 представлены частотные характеристики КСВН при сканировании в  $E$ - (а) и  $H$ -плоскостях (б), КУ (в), уровня кроссполяризации (г), коэффициента передачи (д) и КПД (е) конструкции излучателя с комбинированными вставками.

Согласно рис. 5, а, б рабочая полоса частот

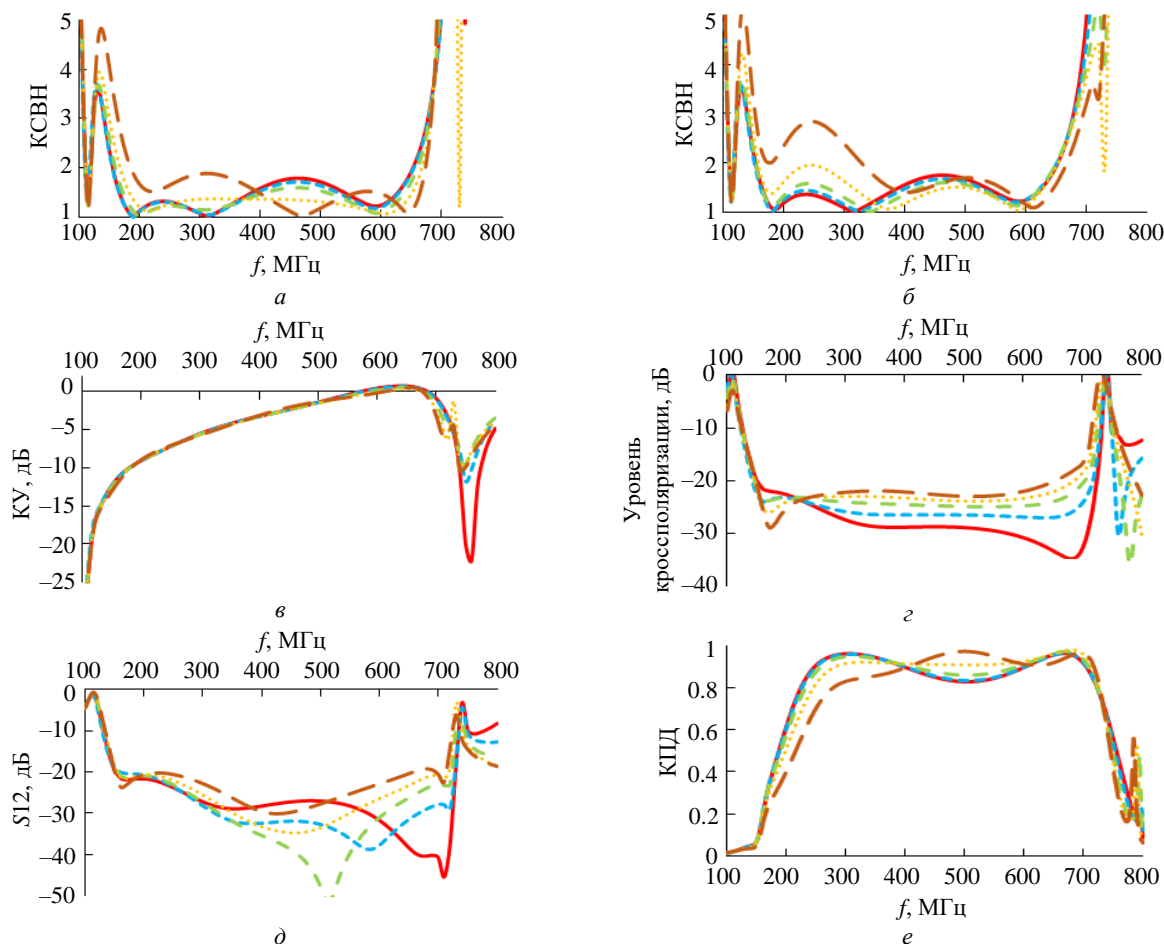


Рис. 5. Частотная характеристика: а, б – КСВН при сканировании в  $E$ - и  $H$ -плоскостях; в – КУ; г – уровни кроссполяризации; д – коэффициента передачи; е – КПД излучателя с комбинированными вставками  
 Fig. 5. Frequency characteristics of: а, б – VSWR in the scanning mode in the  $E$ - and  $H$ -plane; в – realized gain; г – cross-polarization level; д – transmission coefficient; е – efficiency of the radiator with combined inserts

излучателя с комбинированными вставками по уровню КСВН  $\leq 3$  располагается в диапазоне от 164.9 до 677.5 МГц при сканировании в секторе углов  $\pm 60^\circ$  в  $E$ - и  $H$ -плоскостях, чему соответствует значение коэффициента перекрытия 4.109. Из рис. 5, в следует, что в рабочей полосе частот КУ располагается в диапазоне от  $-11.5$  до  $0.8$  дБ. Значение уровня кроссполяризации не превышает  $-18$  дБ, причем в основной части рабочего диапазона оно ниже уровня  $-22$  дБ, как видно из рис. 5, г. Согласно рис. 5, д, е значение коэффициента передачи в основном располагается ниже уровня  $-24$  дБ, а КПД превышает значение 0.82.

**Заключение.** Определено, что использование прямоугольных металлических вставок позволяет расширить рабочую полосу частот с улучшением согласования в  $E$ -плоскости, но ухудшением в  $H$ -плоскости при сканировании на  $60^\circ$ . Эту сложность удастся преодолеть благодаря использованию металлической вставки в раскрыве. В итоге,

излучатель с комбинированными вставками в режиме широкоугольного сканирования в секторе углов  $\pm 60^\circ$  имеет рабочую полосу частот в диапазоне от 164.9 до 677.5 МГц при работе в  $E$ - и  $H$ -плоскостях, чему соответствует значение коэффициента перекрытия 4.109. Электрический размер излучателя на верхней рабочей частоте 677.5 МГц составляет  $0.339\lambda \times 0.339\lambda \times 0.678\lambda$ , а на нижней рабочей частоте 164.9 МГц –  $0.083\lambda \times 0.083\lambda \times 0.165\lambda$ .

Таким образом, благодаря использованию комбинированных вставок удалось увеличить значение коэффициента перекрытия излучателя с сохранением СШП, широкоугольности сканирования в секторе углов  $\pm 60^\circ$  и электрической компактности. Разработанный компактный двухполяризаационный СШП кардиоидный излучатель широкоугольного сканирования с комбинированными вставками может найти применение в системах радиолокации, радионавигации и радиосвязи.

#### Список литературы

1. Антенные решетки спутниковых мобильных телекоммуникационных систем / Е. В. Овчинникова, Э. В. Гаджиев, С. Г. Кондратьев, А. Л. Поландов, П. А. Шмачилин, М. А. Соков, О. А. Волков // *Вопр. электромеханики. Тр. ВНИИЭМ*. 2021. Т. 182, № 3. С. 39–54.
2. Особенности построения фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн для РЛС зенитно-ракетного комплекса малой дальности / О. Ю. Шевцов, А. В. Артюшев, В. М. Крехтунов, М. Е. Голубцов, Ю. С. Русов // *Изв. РА ракетных и артиллерийских наук*. 2010. № 3 (65). С. 61–69.
3. Pandey A. K. Phased Array Antenna with Beamforming Network for 5G mmWave Communication System // 50<sup>th</sup> European Microwave Conf., Utrecht, Netherlands, 12–14 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 364–367. doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338222
4. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев; под. ред. Д. И. Вознесенского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
5. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки. 2-е изд. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
6. Инденбом М. В. Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчет, конструкции. М.: Радиотехника, 2015. 416 с.
7. Gibson P. J. The Vivaldi Aerial // 9<sup>th</sup> European Microwave Conf., Brighton, UK, 17–20 Sept. 1979. IEEE, 1979. P. 101–105. doi: 10.1109/EUMA.1979.332681
8. Dixit A. S., Kumar S. A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna

// IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 45774–45796. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977167

9. Compactness and performance enhancement techniques of ultra-wideband tapered slot antenna: A comprehensive review / S. Saleh, M. H. Jamaluddin, F. Razzaz, S. M. Saeed, N. Timmons, J. Morrison // *Alexandria Eng. J.* 2023. Vol. 74. P. 195–229. doi: 10.1016/j.aej.2023.05.020

10. Ротхаммель К. Антенны / пер. с нем. С. А. Захарченко. 1-е полн. изд. СПб: Бояныч, 1998. 656 с.

11. Guo L., Qiang Y. F. Design of a Compact Wideband Dual-Polarization Antipodal Vivaldi Antenna Array // *IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics*, Chengdu, China, 26–28 March 2018. IEEE, 2018. P. 1–3. doi: 10.1109/COMPEM.2018.8496541

12. A UHF-L Band Dual-polarization BAVA with 0.1 $\lambda$  Profile of Low Frequency / J. Zhu, M. Huang, C. Chen, W. Qiao // *Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Nanjing, China, 23–26 May 2021, IEEE, 2021. P. 1–3. doi: 10.1109/ICMMT52847.2021.9618151

13. Gao X., Liu N.-W., Sun S. An Ultra-wideband Dual-polarized Array Antenna with Wide-angle Scanning Performance // *IEEE MTT-S Int. Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications*, Guangzhou, China, 27–29 Nov. 2022. IEEE, 2022. P. 1–3. doi: 10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10107134

14. Банков С. Е., Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS // *Журн. радиоэлектроники*. 2009. № 5. 736 с.

15. Косак Р. Э., Геворкян А. В. Компактный сверхширокополосный излучатель Вивальди кардиоидной

формы с прямоугольными импедансными вставками // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2024. № 3. С. 276–284.  
doi: 10.18522/2311-3103-2024-3-276-284

16. Пат. RU 231877 U1 H01Q 1/38. Компактный сверхширокополосный излучатель Вивальди кардиоидной формы с прямоугольными вставками / Р. Э. Косак, А. В. Геворкян. Опубл. 14.02.2025. Бюл. № 5.

17. Kosak R. E., Gevorkyan A. V. Compact Ultra-Wideband Cardioid-Shaped Vivaldi Radiator with H-Shaped Impedance Inserts in the Aperture // IEEE 9<sup>th</sup> All-Russ. Microwave Conf., Moscow, Russia, 25–29 Nov. 2024. IEEE, 2024. P. 330–334.  
doi: 10.1109/RMC62880.2024.10846865

### Информация об авторах

**Косак Роман Эдуардович** – магистр по направлению "Радиотехника" (2022, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог), аспирант, заведующий лабораторией кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог). Автор 17 научных работ. Сфера научных интересов – антенны Вивальди; антенные решетки и фазированные антенные решетки; печатные излучатели.

Адрес: Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, д. 44, Таганрог, 347922, Россия

E-mail: kosak@sfedu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0220-3501>

**Геворкян Армен Валерьевич** – кандидат технических наук (2017), доцент кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (Таганрог). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – антенны; СВЧ-устройства; антенные решетки; импедансные структуры.

Адрес: Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, д. 44, Таганрог, 347922, Россия

E-mail: gevorkyan.scr@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1910-4737>

### References

1. Ovchinnikova E. V., Gadzhiev E. V., Kondratieva S. G., Polandov A. L., Shmachilin P. A., Sokov M. A., Volkov O. A. Antenna Arrays for Satellite Mobile Telecommunication Systems]. Questions of Electromechanics. Proc. of VNIEM. 2016, vol. 182, no. 3, pp. 39–54. (In Russ.)

2. Shevtsov O. Yu., Artyushchev A. V., Krekhtunov V. M., Golubtsov M. E., Rusov Yu. S. Features of the Construction of Phased Arrays of the Millimeter Wave Range for the Radar of a Short-Range Anti-Aircraft Missile System. News of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2010, vol. 3, no. 65, pp. 61–69. (In Russ.)

3. Pandey A. K. Phased Array Antenna with Beamforming Network for 5G mmWave Communication System. 50<sup>th</sup> European Microwave Conf., Utrecht, Netherlands, 12–14 Jan. 2021. IEEE, 2021, pp. 364–367.  
doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338222

4. Voskresensky D. I., Gostyukhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Ustrojstva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Microwave Devices and Antennas. Design of Phased Array Antennas: A Textbook for Universities], 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Radiotekhnika, 2006, 376 p. (In Russ.)

5. Hansen R. C. Phased Array Antennas. 2<sup>nd</sup> ed. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2009, 576 p.

6. Indenbom M. V. *Antennye reshetki podvizhnykh obzornykh RLS. Teoriya, raschet, konstrukcii. Monografiya* [Antenna Arrays of Mobile Surveillance Radars. Theory, Calculation, Designs]. Moscow, Radiotekhnika, 2015, 416 p. (In Russ.)

7. Gibson P. J. The Vivaldi Aerial. 9<sup>th</sup> European Microwave Conf., Brighton, UK, 17–20 Sept. 1979. IEEE, 1979, pp. 101–105.

doi: 10.1109/EUMA.1979.332681

8. Dixit A. S., Kumar S. A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 45774–45796.  
doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977167

9. Saleh S., Jamaluddin M. H., Razzaz F., Saeed S. M., Timmons N., Morrison J. Compactness and Performance Enhancement Techniques of Ultra-Wideband Tapered Slot Antenna: A Comprehensive Review. Alexandria Eng. J. 2023, vol. 74, pp. 195–229.  
doi: 10.1016/j.aej.2023.05.020

10. Rothammel K. Antennenbuch. Berlin, Deutscher Militärverlag, 1968, 594 p. (In German)

11. Guo L., Qiang Y. F. Design of a Compact Wideband Dual-Polarization Antipodal Vivaldi Antenna Array. IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics, Chengdu, China, 26–28 March 2018. IEEE, 2018, pp. 1–3.  
doi: 10.1109/COMPEN.2018.8496541

12. Zhu J., Huang M., Chen C., Qiao W. A UHF-L Band Dual-polarization BAVA with 0.1 $\lambda$  Profile of Low Frequency. Intern. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, Nanjing, China, 23–26 May 2021, IEEE, 2021, pp. 1–3.  
doi: 10.1109/ICMMT52847.2021.9618151

13. Gao X., Liu N.-W., Sun S. An Ultra-wideband Dual-polarized Array Antenna with Wide-angle Scanning Performance. IEEE MTT-S Int. Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications, Guangzhou, China, 27–29 Nov. 2022. IEEE, 2022, pp. 1–3.  
doi: 10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10107134

14. Bankov S. E., Kurushin A. A. Designing Microwave Devices and Antennas with Ansoft HFSS. J. of Radio Electronics. 2009, no. 5, 736 p. (In Russ.)

15. Kosak R. E., Gevorkyan A. V. Compact Ultra-Wideband Cardioid Vivaldi Radiator with Rectangular Impedance Inserts. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2024, no. 3, pp. 276–284. (In Russ.) doi: 10.18522/2311-3103-2024-3-276-284.

16. Kosak R. E., Gevorkyan A. V. *Kompaktnyj sverhshirokopolosnyj izluchatel' Vival'di kardioidnoj formy s prjamo-ugol'nymi vstavkami* [Compact Ultra-Wideband

Cardioid-Shaped Vivaldi Radiator with Rectangular Inserts]. Pat. RF, no. 231877, Publ. 14.02.2025. (In Russ.)

17. Kosak R. E., Gevorkyan A. V. Compact Ultra-Wideband Cardioid-Shaped Vivaldi Radiator with H-Shaped Impedance Inserts in the Aperture. *IEEE 9<sup>th</sup> All-Russ. Microwave Conf., Moscow, Russia, 25–29 Nov. 2024. IEEE, 2024*, pp. 330–334. doi: 10.1109/RMC62880.2024.10846865

#### Information about the authors

**Roman E. Kosak**, Master's degree in Radio Engineering (2022, Institute of Radio Engineering Systems and Control of Southern Federal University (Taganrog), Postgraduate student, Head of the laboratory of the Department of Antennas and Radiotransmitting Devices of Institute of Radio Engineering Systems and Control of Southern Federal University (Taganrog). The author of 17 scientific publications. Area of expertise: Vivaldi antennas; array antennas and phased array antennas; printed radiators.

Address: Southern Federal University, 44, lane Nekrasovsky, Taganrog 347922, Russia

E-mail: kosak@sfedu.ru.

<https://orcid.org/0000-0002-0220-3501>.

**Armen V. Gevorkyan**, Cand. Sci. (Eng.) (2017), Associate Professor of the Department of Antennas and Radiotransmitting Devices of Institute of Radio Engineering Systems and Control of Southern Federal University (Taganrog). The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: antennas; microwave devices; antenna bars; impedance structures.

Address: Southern Federal University, 44, lane Nekrasovsky, Taganrog 347922, Russia

E-mail: gevorkyan.scp@yandex.ru.

<https://orcid.org/0000-0002-1910-4737>

---

## Метод дистанционного определения состояния плоскостлой среды по поляризационным отношениям обратного рассеяния

В. Г. Машков<sup>✉</sup>, А. Е. Милях, В. И. Рябев

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", Воронеж, Россия

<sup>✉</sup>[myvblaze@mail.ru](mailto:myvblaze@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Уровень безопасности при осуществлении различного рода деятельности на снежно-ледяном покрове водоема напрямую зависит от того, насколько точно можно определить его состояние. Например, когда требуется посадить вертолет на необорудованную и неразведанную заснеженную площадку или на замерзший водоем, чтобы перевезти грузы, людей, эвакуировать пострадавших или провести поисково-спасательные работы. Возможность удаленно выявлять характеристики слоев снежно-ледяного покрова и воссоздавать их структуру позволяет принять решение, можно ли сажать вертолет в выбранном месте или нужно искать альтернативную площадку, которая будет соответствовать необходимым требованиям. От этого будет зависеть уровень безопасности посадки воздушного судна.

**Цель работы.** Разработка неинвазивного метода исследования плоскостлой среды посредством изучения поляризационных отношений сигналов обратного рассеяния – с вертикальной и горизонтальной поляризациями – в рамках работы радиолокационной системы подповерхностного зондирования, размещенной на борту вертолета.

**Материалы и методы.** Для моделирования работы радиолокационной системы, предназначенной для подповерхностного зондирования, применялась платформа Engage и язык программирования Julia.

**Результаты.** Создан инновационный метод, позволяющий дистанционно оценивать характеристики плоскостлой среды. В основе подхода – анализ поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния от границ раздела слоев плоскостлой среды с вертикальной и горизонтальной поляризациями. Выявлены диапазоны соотношений поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния, которые коррелируют с различными плотностями слоев снежно-ледяного покрова при определенных углах.

**Заключение.** Разработка неинвазивного метода исследования плоскостлых сред посредством изучения поляризационных характеристик обратнорассеянного радиосигнала открывает новые возможности в оценке снежно-ледяного покрова. Благодаря этому подходу становится возможным автоматизировать процедуру анализа пригодности неподготовленных и неразведанных заснеженных площадок или водоемов со снежно-ледяным покровом для посадки вертолетов. Отличительная черта предложенного метода заключается в его способности распознавать все слои в многослойной среде, в то время как существующие методы, как правило, ограничиваются анализом лишь приповерхностного слоя.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, наклонное зондирование, подстилающая поверхность, поляризационное отношение, состояние снежно-ледяного покрова, плоскостлая среда

**Для цитирования:** Машков В. Г., Милях А. Е., Рябев В. И. Метод дистанционного определения состояния плоскостлой среды по поляризационным отношениям обратного рассеяния // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 49–63.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-49-63

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

Статья поступила в редакцию 16.12.2025; принята к публикации после рецензирования 18.02.2026; опубликована онлайн 30.04.2026



## Method for Remote Assessment of Planar Layered Media by Polarization Backscattering Relations

Viktor G. Mashkov , Aleksandr E. Milyah, Viktor I. Ryabev

Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy  
named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, Russia

 mvgblaze@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** The safety of conducting activities on the snow and ice cover of a reservoir depends directly on the accuracy of its condition assessment. This is particularly important when landing a helicopter on unequipped and unexplored snow-covered areas or frozen water bodies for transporting goods and people, evacuating victims, or conducting search and rescue operations. The ability to remotely assess the characteristics of snow and ice layers and reconstruct their structure makes it possible to conclude whether the selected site is suitable for helicopter landing or whether an alternative site, which meets the necessary requirements, should be selected. Ultimately, this determines the safety of aircraft landing.

**Aim.** Development of a non-invasive method for assessing planar layered media based on polarization relationships of backscattering signals with vertical and horizontal polarizations within a helicopter-mounted subsurface sensing radar system.

**Materials and methods.** The Engee platform and the Julia programming language were used to simulate the operation of a radar system for subsurface sensing.

**Results.** An innovative method for remote assessment of the characteristics of planar layered media is proposed. The approach is based on analyzing the polarization properties of backscattered signals from the interfaces of layers within a planar layered medium, using both vertical and horizontal polarizations. Specific ranges of polarization backscattering ratios that correlate with varying densities of snow and ice layers at particular incidence angles are identified.

**Conclusion.** The proposed non-invasive method for analyzing planar layered media based on polarization characteristics of backscattered radio signals opens up new possibilities for the assessment of snow and ice cover. This approach makes it possible to evaluate unprepared and unexplored snow-covered sites, as well as reservoirs covered with snow and ice, for helicopter landing. A distinctive feature of the proposed method lies in its ability to detect and characterize all layers within a multilayer environment, compared to existing methods that are limited to analyzing exclusively the near-surface layer.

**Keywords:** permittivity, oblique sensing, underlying surface, polarization attitude, snow and ice cover state, planar layered medium

**For citation:** Mashkov V. G., Milyah A. E., Ryabev V. I. Method for Remote Assessment of Planar Layered Media by Polarization Backscattering Relations. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 49–63.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-49-63

---

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

Submitted 16.12.2025; accepted 18.02.2026; published online 30.04.2026

---

**Введение.** В настоящее время в различных областях – как в военном деле, так и в гражданской сфере – все шире используются радиолокационные системы, функционирующие на основе непрерывного частотно-модулированного сигнала. Хотя несколько ранее интерес к подобным технологиям немного угас, сейчас ситуация изменилась благодаря существенному

уменьшению размеров и стоимости электронных компонентов. Это позволило разработать компактные радиолокаторы с непрерывным излучением, которые находят применение в авиации, автомобильной промышленности, в сфере беспилотных летательных аппаратов и робототехники, успешно решая разнообразные радиолокационные задачи [1].

Одним из перспективных направлений является разработка радиолокационных систем подповерхностного зондирования, которые устанавливаются на воздушные суда вертолетного типа (ВСВТ) [2–4]. Такие системы незаменимы при поиске места и осуществлении посадки на неподготовленные площадки, покрытые снегом [5], в том числе на водоемы со снежно-ледяным покровом [6]. Эти поверхности представляют собой плоскостойкую среду, и использование радиолокационных технологий позволяет обеспечить требуемый уровень безопасности посадки.

Применение сверхширокополосного непрерывного линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала для дистанционного зондирования поверхности обладает рядом преимуществ по сравнению с импульсным методом [1]: излучение сигнала большей длительностью на порядки; мощность излучения единицы ватт при сохранении требуемой разрешающей способности; не требуются мощные импульсные усилители с высоковольтными источниками питания и т. д. Кроме того, полоса пропускания зондирующих сигналов от 1 ГГц не обязательна к полосе оцифровываемых частот (единицы и десятки мегагерц) аналого-цифровых преобразователей и нет необходимости blankирования приемника во время излучения передатчика. Это дает возможность наблюдать объекты и участки местности, расположенные на близком расстоянии, т. е. устраняет проблему "мертвой зоны". К другим преимуществам можно отнести высокую радиотехническую скрытность и помехозащищенность системы.

Сверхширокополосный ЛЧМ-сигнал позволяет фиксировать пики эхосигналов, отраженных от границ слоев плоскостойкой среды, благодаря различиям в диэлектрической проницаемости этих слоев [7]. Анализируя временную задержку эхосигналов, можно определить толщину слоев. Амплитуды эхосигналов, полученные при наклонном зондировании с вертикальной и горизонтальной поляризациями, позволяют косвенно установить диэлектрическую проницаемость слоев снежно-ледяного покрова и идентифицировать их.

При принятии решения о посадке ВСВТ на неразведанную заснеженную площадку или на замерзший водоем необходимо учитывать ре-

альное состояние снежно-ледяного покрова, поскольку это напрямую влияет на уровень безопасности. Оценивается, к какому типу относится каждый слой покрова и его высота (толщина). Например, для вертолета Ми-8АМТШ с максимальной взлетной массой 13 000 кг допустимая глубина снежного покрова не должна превышать 50 см, а толщина ледяного покрова должна быть не менее 39.7 см при использовании колесного шасси и не менее 36.1 см – при лыжном [8].

Цель описываемой работы – разработка неинвазивного метода исследования плоскостойкой среды посредством изучения поляризационных отношений сигналов обратного рассеяния – с вертикальной и горизонтальной поляризациями – в рамках работы радиолокационной системы подповерхностного зондирования, размещенной на борту вертолета. Итоговая задача – определять уровень безопасности посадки на поверхность, в том числе покрытую снегом и льдом, будь то суша или водоем.

Значительный вклад в развитие радиополяриметрии, достаточно широко описанный в отечественных и зарубежных источниках, внесли такие ученые, как В. Бернер, В. В. Богородский, В. Е. Дулевич, Д. Б. Канарейкин, З. Кжиш, Ш. Клауд, А. И. Козлов, Е. Крогагер, Л. П. Лигтхарт, А. И. Логвин, Е. Люнебург, В. А. Мелитицкий, Н. Ф. Павлов, С. И. Поздняк, В. А. Потехин, В. А. Сарычев, В. Н. Татарин, Е. Потье, Дж. Сайярда; в развитие подповерхностного зондирования – Л. А. Беховых, В. Ф. Борулько, Л. М. Бреховских, А. Ф. Глазовский, А. Ю. Гринев, В. М. Котляков, Э. И. Лазарев, Ю. Я. Мачерет, Н. Т. Ничипоренко, С. В. Попов, М. И. Финкельштейн, А. Н. Чижов, А. Д. Фролов и другие (без претензий на полноту перечисления).

В [9, 10] представлен метод косвенного определения относительной диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя, расположенного у границы "тропосфера – подстилающая поверхность", при использовании техники наклонного зондирования в определенном диапазоне углов от 25 до 75°.

Рассмотрим ситуацию, когда объектом исследования выступает плоскостойкая среда, состоящая из  $N$  слоев и представляющая собой снежно-ледяной покров. Для его изучения применяется метод наклонного зондирования

с помощью непрерывного сигнала, частота которого линейно изменяется, при этом используются сигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями.

После приема эхосигналов на тех же поляризациях определяется их отношение и по полученным значениям рассчитывается комплексная относительная диэлектрическая проницаемость (КОДП) каждого из нижележащих слоев снежно-ледяного покрова.

Далее, используя данные о косвенных измерениях относительной диэлектрической проницаемости слоев и соотношениях обратного рассеяния отраженных радиосигналов (с вертикальной и горизонтальной поляризациями), проводится сопоставление с расчетными (образцовыми) значениями. При достижении условия сходимости алгоритма устанавливается тождество, которое позволяет провести идентификацию слоев плоскостройной среды.

В основе неинвазивного метода исследования плоскостройной среды лежит следующий физический принцип: при проведении наклонного зондирования в определенном диапазоне углов (от 25 до 75°) наблюдается закономерность – интенсивность обратного рассеяния эхосигналов находится в прямой зависимости от значения спектральной плотности  $\Xi(\vec{K}_{\text{Вгн}})$ , которая отражает распределение высот неровностей поверхности над однородным диэлектрическим полупространством. Это соответствует волновому числу  $2k \sin \theta = 2\pi/d$ , где  $\theta$  – угол падения радиоволны на границу слоев;  $d$  – интервал шероховатостей на поверхности. Зависимость обусловлена резонансным (брегговским) механизмом рассеяния [9], который позволяет охарактеризовать диэлектрические свойства слоев плоскостройной среды [11].

Суть явления заключается в том, что рассеяние радиоволн происходит главным образом для тех спектральных составляющих, которые соответствуют определенному интервалу шероховатостей  $d$  на поверхности. Распространение резонансных составляющих поля поверхностных волн по плоской поверхности описывается выражением [9]

$$\sigma^{\text{pp}0}(k_{\text{гн}}, \theta, \varepsilon_{\text{гн}}) = 8k_{\text{гн}}^4 |G^{\text{pp}}(\theta, \varepsilon_{\text{гн}})|^2 \Xi(\vec{K}_{\text{Вгн}}), \quad (1)$$

где  $\sigma^{\text{pp}0}$  – нормированное сечение обратного рассеяния; pp – тип поляризации (vv – вертикальная и hh – горизонтальная);  $k_{\text{гн}}$  – волновое число радиоволны;  $|G^{\text{pp}}(\theta, \varepsilon_{\text{гн}})|^2$  – геометрический коэффициент (зависящий от вида pp, угла падения радиоволны на границу слоев  $\theta$ , диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_{\text{гн}}$  слоев плоскостройной среды);  $\Xi(\vec{K}_{\text{Вгн}})$  – спектр поверхности;  $\vec{K}_{\text{Вгн}}$  – волновой вектор резонансной компоненты.

Отметим, что тип поляризации не влияет на  $k_{\text{гн}}$ . Спектр  $\Xi(\vec{K}_{\text{Вгн}})$  позволяет количественно оценить амплитуду вертикально и горизонтально поляризованных эхосигналов, а их отношение определяется комбинацией трех ключевых параметров: диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{\text{гн}}$ , углом зондирования  $\theta$  и рабочей частотой  $f$  [9].

Диэлектрическая проницаемость каждого последующего нижнего слоя  $\varepsilon_{\text{гн}}$  вычисляется на основе анализа поляризационных отношений эхосигналов  $P_{\text{гн}}$ , зарегистрированных с вертикальной и горизонтальной поляризациями, с учетом  $\theta$  и  $f$ .

**Прямая задача.** В процессе исследования вычисления проводились с использованием программного обеспечения MATLAB. На основе анализа данных, полученных при изучении обратного рассеяния радиосигналов, определялась комплексная относительная диэлектрическая проницаемость слоев плоскостройной среды. Результаты исследования визуализированы на рис. 1, а расчетные данные получены по формуле (1). При этом учитывались поляризационные отношения радиосигналов  $P_{\text{гн}}$  – как с вертикальной  $\sigma_{\text{гн}}^{\text{vv}0}$  (рис. 2, а), так и с горизонтальной  $\sigma_{\text{гн}}^{\text{hh}0}$  (рис. 2, б) поляризациями:

$$P_{\text{гн}} = \frac{\sigma_{\text{гн}}^{\text{vv}0}}{\sigma_{\text{гн}}^{\text{hh}0}} = \frac{|G_{\text{гн}}^{\text{vv}}(\theta, \varepsilon_{\text{гн}})|^2}{|G_{\text{гн}}^{\text{hh}}(\theta, \varepsilon_{\text{гн}})|^2}, \quad (2)$$

где фигурируют параметры, представляющие собой нормированные значения сечения обратного рассеяния  $\sigma_{\text{гн}}^{\text{vv}0}$  и  $\sigma_{\text{гн}}^{\text{hh}0}$ , которые были

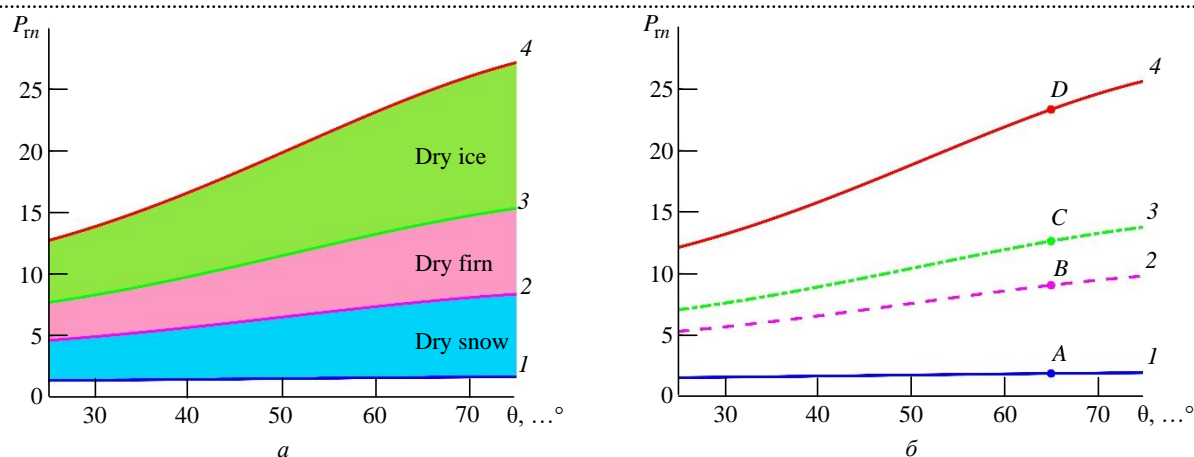


Рис. 1. Графики зависимостей поляризационного отношения  $P_m$  обратного рассеяния сигналов:  $a$  – с вертикальной  $\sigma^{vv0}$ , полученных по (2), (3);  $b$  – горизонтальной  $\sigma^{hh0}$ , полученных по (2), (4), поляризациями от угла зондирования в пределах  $\theta = 25...75^\circ$

Fig. 1. Dependence of polarization ratio  $P_m$  of signal backscattering:  $a$  – with vertical  $\sigma^{vv0}$ , obtained by Eqs. (2) and (3);  $b$  – with horizontal  $\sigma^{hh0}$ , obtained by polarizations from the sensing angle within  $\theta = 25...75^\circ$  using Eqs. (2) and (4)

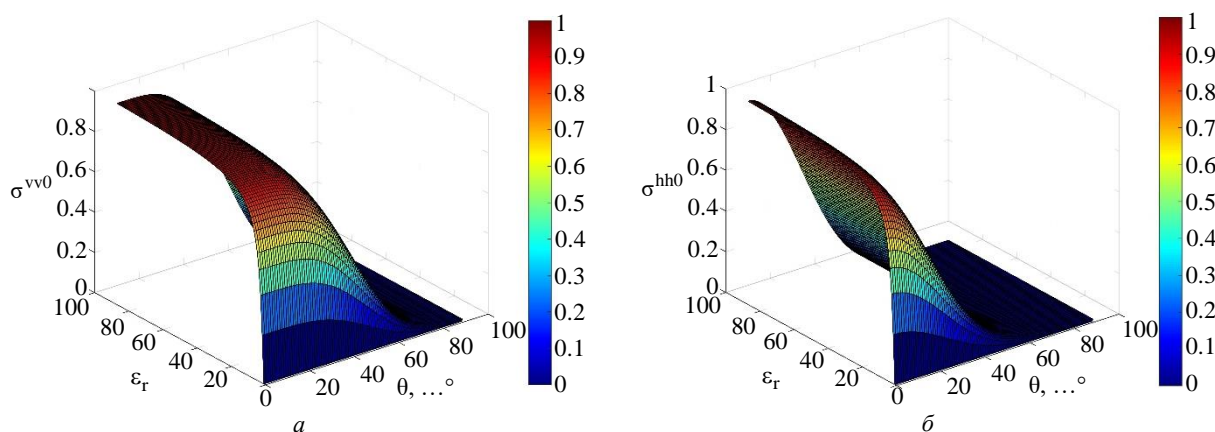


Рис. 2. Нормированное сечение обратного рассеяния с вертикальной  $\sigma^{vv0}$  (а) и горизонтальной  $\sigma^{hh0}$  (б) поляризациями в зависимости от  $\epsilon_r$  и  $\theta$

Fig. 2. Normalized backscatter cross section with vertical  $\sigma^{vv0}$  (a) and horizontal  $\sigma^{hh0}$  (b) polarizations depending on  $\epsilon_r$  and  $\theta$

зафиксированы при измерении на вертикальной (vv) и горизонтальной (hh) поляризациях. Также в формуле присутствует величина  $n$ , отражающая число пиков эхосигнала, – она соответствует количеству границ раздела слоев в плоскостной среде, характеризующейся различными комплексными относительными диэлектрическими проницаемостями. Эти границы образуются в снежно-ледяном покрове.

Кроме того, в выражении учитываются геометрические коэффициенты  $|G_{rn}^{vv}(\theta, \epsilon_{rn})|^2$ ,

$|G_{rn}^{hh}(\theta, \epsilon_{rn})|^2$ , зависящие от  $\theta$ ,  $\epsilon_{rn}$ ,  $\theta$  и  $f$  [9]:

$$|G_{rn}^{vv}(\theta, \epsilon_{rn})|^2 = \cos^4 \theta \frac{(\epsilon_{rn} - 1) [\epsilon_{rn} (1 + \sin^2 \theta) - \sin^2 \theta]}{[\epsilon_{rn} \cos \theta + \sqrt{\epsilon_{rn} - \sin^2 \theta}]^2}; \quad (3)$$

$$|G_{rn}^{hh}(\theta, \epsilon_{rn})|^2 = \cos^4 \theta \frac{\epsilon_{rn} - 1}{[\epsilon_{rn} \cos \theta + \sqrt{\epsilon_{rn} - \sin^2 \theta}]^2}. \quad (4)$$

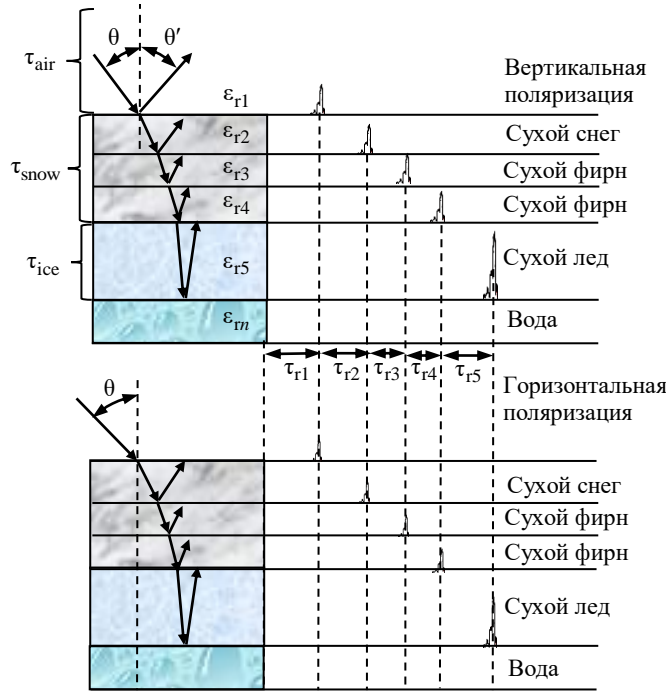


Рис. 3. Отраженные радиосигналы с вертикальной и горизонтальной поляризациями для  $n$ -й границы раздела слоев снежно-ледяного покрова  
 Fig. 3. Reflected radio signals with vertical and horizontal polarization for the  $n$ -th boundary of the snow-ice cover layers

Еще один важный параметр – это угол зондирования исследуемого участка плоскостной среды  $\theta = 25...75^\circ$ . Его значение определяется с учетом резонансного (брэгговского) механизма рассеяния [9].

Выполненные вычисления показали, что существует соответствие между диапазонами плотностей снежно-ледяного покрова и интервалами значений поляризационных отношений при обратном рассеянии сигналов (рис. 3).

В качестве иллюстрации можно рассмотреть такие материалы, как сухой снег (dry snow) с плотностью  $\rho_{ds} = 100...500 \text{ кг/м}^3$  ( $\epsilon_{ds} = 1.16...1.98$ ) –  $P_{rn} = 1.68...7.80$  (интервалы между линиями 1 и 2 на рис. 1), сухой фирн (dry firn)  $\rho_{df} = 500...700 \text{ кг/м}^3$  ( $\epsilon_{df} = 1.98...2.51$ ) –  $P_{rn} = 7.80...14.07$  (интервалы между линиями 2 и 3) и сухой лед (dry ice)  $\rho_{di} = 700...917 \text{ кг/м}^3$  ( $\epsilon_{di} = 2.51...3.18$ ) –  $P_{rn} = 14.07...24.69$  (интервалы между линиями 3 и 4). Если обратиться к поляризационным отношениям (см. рис. 1), то можно увидеть, что при  $\theta = 65^\circ$  точки (A) –  $P_{r2} = 1.8613$ , (B) –  $P_{r3} = 9.0212$ , (C) –  $P_{r4} =$

$= 12.6012$  и (D) –  $P_{r5} = 23.2799$  соотносятся следующим образом: вариант 1 –  $\epsilon_{r2} = 1.2 - j0.0008$  соответствует сухому снегу; вариант 2 –  $\epsilon_{r3} = 2.1 - j0.0008$  – сухому фирну; вариант 3 –  $\epsilon_{r4} = 2.4 - j0.0008$  – также сухому фирну; а вариант 4 –  $\epsilon_{r5} = 3.1 - j0.0008$  – сухому льду.

При повышении уровня влажности показатели поляризационных соотношений  $P_{rn}$ , связанных с обратным рассеянием сигналов, демонстрируют существенный рост, приближаясь к характеристикам, типичным для водной среды. Например, в случае морской воды (sea water,  $\epsilon'_{sw} = 74$ ) соленостью  $S_{sw} = 35 \text{ г/кг}$  – это  $P_{rn} = 17\,949$ , а в ситуации с пресной (талой) водой (pure water,  $\epsilon'_{pw} = 87$ ) –  $P_{rn} = 24\,854$ .

Решение прямой задачи можно представить в формализованном виде следующим образом:

$$\begin{aligned}
 A &= \{ \epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \dots, \epsilon_{rn}, h_{r1}, h_{r2}, \dots, h_{rn} \} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \{ \sigma_{r1}^{vv0}, \sigma_{r2}^{vv0}, \dots, \sigma_{rn}^{vv0}, \sigma_{r1}^{hh0}, \dots, \\
 &\dots, \sigma_{r2}^{hh0}, \dots, \sigma_{rn}^{hh0}, \tau_{r1}, \tau_{r2}, \dots, \tau_{rn} \} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \{ P_{r1,2}, P_{r2,3}, \dots, P_{ri+1,n}, \tau_{r1,2}, \tau_{r2,3}, \dots, \tau_{ri+1,n} \}.
 \end{aligned}$$

По заданным  $\varepsilon_{\Gamma n}$  и  $h_{\Gamma n}$  рассчитываются нормированные сечения обратного рассеяния с учетом вида поляризации  $\sigma_{\Gamma n}^{vv0}$ ,  $\sigma_{\Gamma n}^{hh0}$  и задержки эхосигналов для каждого последующего слоя при вертикальном зондировании в надир (без учета угла наклонного зондирования):

$$\tau_{\Gamma n} = 2h_{\Gamma n}/v_{\Gamma n}. \quad (5)$$

В (5) используется параметр, отражающий скорость распространения электромагнитной волны  $v_{\Gamma n}$  в конкретном  $n$ -слое. С его помощью можно определить поляризационные соотношения  $P_{\Gamma i+1,n}$  для сигналов, рассеянных обратно. Сигналы с вертикальной поляризацией  $\sigma_{\Gamma n}^{vv0}$  рассчитываются с применением (2) и (3), а с горизонтальной  $\sigma_{\Gamma n}^{hh0}$  – с помощью (2) и (4). Кроме того, для каждой границы между слоями плоскостройной среды вычисляются временные задержки  $\tau_{\Gamma i+1,n}$ .

**Обратная задача.** Процесс решения обратной задачи, направленной на выявление электрофизических и геометрических характеристик плоскостройной среды, заключается в анализе комплексной относительной диэлектрической проницаемости ее слоев. Для этого определяются поляризационные соотношения обратного рассеяния сигналов, причем рассматриваются сигналы как с вертикальной, так и с горизонтальной поляризациями.

Рассмотрим ситуацию, когда объектом исследования выступает плоскостройная среда, состоящая из  $N$  слоев и представляющая собой снежно-ледяной покров. Для изучения такой среды применяется метод наклонного зондирования в интервале от 25 до 75°, используется непрерывный ЛЧМ-сигнал с вертикальной и горизонтальной поляризациями. Получают соотношения нормированных сечений обратного рассеяния  $P_{\Gamma i+1,n}$  на границе  $i$ -го и  $(i+1)$ -го слоев плоскостройной среды для сигналов с вертикальной  $\sigma_{\Gamma i+1,n}^{vv0}$  и горизонтальной  $\sigma_{\Gamma i+1,n}^{hh0}$  поляризациями.

Последовательно рассчитывается значение комплексной относительной диэлектрической

проницаемости  $\varepsilon_{\Gamma n}$  нижележащего слоя по формулам (2)–(4). При этом учитывается порядковый номер слоя в структуре покрова ( $n = 2, 3, \dots, N$ ):

$$\varepsilon_{\Gamma n} = \frac{\sqrt{P_{\Gamma i+1,n} + \sin^2 \theta}}{1 + \sin^2 \theta}. \quad (6)$$

Решение обратной задачи можно представить в формализованном виде следующим образом:

$$\begin{aligned} B &= \left\{ \sigma_{\Gamma 1,2}^{vv0}, \sigma_{\Gamma 2,3}^{vv0}, \dots, \sigma_{\Gamma i+1,n}^{vv0}, \sigma_{\Gamma 1,2}^{hh0}, \sigma_{\Gamma 2,3}^{hh0}, \dots, \right. \\ &\quad \left. \sigma_{\Gamma i+1,n}^{hh0}, \tau_{\Gamma 1,2}, \tau_{\Gamma 2,3}, \dots, \tau_{\Gamma i+1,n} \right\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left\{ P_{\Gamma 1,2}, P_{\Gamma 2,3}, \dots, P_{\Gamma i+1,n}, \tau_{\Gamma 1}, \tau_{\Gamma 2}, \dots, \tau_{\Gamma n} \right\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left\{ \varepsilon_{\Gamma 1}, \varepsilon_{\Gamma 2}, \dots, \varepsilon_{\Gamma n}, h_{\Gamma 1}, h_{\Gamma 2}, \dots, h_{\Gamma n} \right\}. \end{aligned}$$

На основе проанализированных нормированных сечений, отражающих обратное рассеяние сигналов с вертикальной  $\sigma_{\Gamma i+1,n}^{vv0}$  и горизонтальной  $\sigma_{\Gamma i+1,n}^{hh0}$  поляризациями, а также учитывая задержку сигнала  $\tau_{\Gamma i+1,n}$  до границы раздела  $i$ -го и  $(i+1)$ -го слоев, определяются соотношения  $P_{\Gamma i+1,n}$  и задержки  $\tau_{\Gamma n}$  для каждого нижележащего слоя плоскостройной среды. Получают значения комплексных относительных диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_{\Gamma n}$  и толщин слоев  $h_{\Gamma n}$ .

Для определения состояния слоев плоскостройной среды измеренные значения комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\Gamma n}$  сравнивают с заранее рассчитанными эталонными показателями  $\varepsilon_{\Gamma \Delta}$ .

На основании совпадения  $\varepsilon_{\Gamma n} = \varepsilon_{\Gamma \Delta}$  значений действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\Gamma n} = \varepsilon'_{\Gamma n} - j\varepsilon''_{\Gamma n}$ ,  $\varepsilon_{\Gamma \Delta} = \varepsilon'_{\Gamma \Delta} - j\varepsilon''_{\Gamma \Delta}$  можно установить состояние слоев снежно-ледяного покрова водоема.

Действительная  $\varepsilon'_{\Gamma n}$  и мнимая  $\varepsilon''_{\Gamma n}$  части КОДП  $n$ -слоя трехкомпонентной среды сравниваются с заданными значениями для различных влажных сред:  $\varepsilon_{vs\Delta}$  – снега;  $\varepsilon_{vf\Delta}$  – фирна;  $\varepsilon_{vi\Delta}$  – льда;  $\varepsilon_{pw\Delta}$  – пресной (pw) и  $\varepsilon_{sw\Delta}$  – морской воды (sw).

Примечательно, что при температурах ниже нуля ( $t = -1 \dots -40$  °C) действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости слоев  $\varepsilon'_r$  ( $\varepsilon'_s$  – снега (s);  $\varepsilon'_f$  – фирна (f);  $\varepsilon'_i$  – льда (i)) с плотностью слоев  $\rho_r = 100 \dots 917$  кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_s = 100 \dots 500$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_f = 500 \dots 700$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_i = 700 \dots 917$  кг/м<sup>3</sup>) не зависит от  $f = 1 \dots 10$  ГГц, а определяется в основном температурой  $t$ , причем зависимость эта проявляется лишь в небольших пределах.

Для вычисления значений действительной части КОДП среды  $\varepsilon'_r$  были использованы расчеты по формуле, предложенной Г. Луэнгом [11–14]. Расчеты проведены для сред, содержащих сферические включения воздуха и льда:

$$\varepsilon'_r = \left\{ v_i \left[ (\varepsilon'_i)^{1/3} - 1 \right] + 1 \right\}^3. \quad (7)$$

В формуле учитывается объемное содержание льда  $v_i = \rho_r / \rho_i$ , плотность сухой среды  $\rho_r$  (сухой снег  $\rho_{ds}$ ; фирн  $\rho_{df}$ ; лед  $\rho_{di}$  (без воздушных включений  $\rho_i = 917$  кг/м<sup>3</sup>)), действительная часть КОДП льда  $\varepsilon'_i$ .

Двухкомпонентная смесь при  $t = 0$  °C состоит из льда и пор, заполненных водой:

$$\varepsilon'_{vr} = \left[ \varepsilon'_r^{1/3} + P_w \left( \varepsilon'_w^{1/3} - \varepsilon'_i^{1/3} \right) \right]^3. \quad (8)$$

Существенную роль играет общее содержание воды в смеси  $P_w$ , а также действительная часть КОДП для льда  $\varepsilon'_i$  и воды  $\varepsilon'_w$  соответственно.

В общем случае с учетом (7) и (8) для льда с вкраплениями воды и воздуха [11–14] формула

$$\varepsilon'_{vr} = \left[ \varepsilon'_r^{1/3} (1 - P_{wa}) + P_w \left( \varepsilon'_w^{1/3} + P_{wa} - P_w \right) \right]^3$$

содержит  $P_{wa}$  – совокупную долю воды и воздуха в составе.

Анализ погрешности определения КОДП слоев по поляризационным отношениям  $P_{rn}$  нормированных сечений обратного рассеяния сигналов  $\sigma^{pp0}$  (см. рис. 1, а) показывает довольно неплохие результаты. При применении предложенной формулы (6) для оценки  $\varepsilon_{rn}$  (без учета шума

и при использовании расчетных параметров в условиях отсутствия влаги, как описано в выражениях (2)–(4)), методическая погрешность не превышает 1%. Это подтверждает обоснованность применения (6) в данных условиях.

В процессе имитационного моделирования для анализа погрешности измерения КОДП слоев [15–18] учитывалось многообразие случайных факторов, характерных для реальных практических условий. С целью моделирования искажений в результатах измерений к значениям поляризационных отношений  $P_{rn}$  нормированных сечений обратного рассеяния сигналов  $\sigma^{vv0}$ ,  $\sigma^{hh0}$  и задержкам  $\tau_{ri}$  в каждом слое плоскостройной среды добавлен аддитивный некоррелированный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и определенным уровнем дисперсии:

$$\begin{cases} P_{ri,i+1 \text{ exp}} = P_{ri,i+1} + n(f_\xi); \\ \tau_{rn \text{ exp}} = \tau_{rn} + n(f_\xi). \end{cases}$$

Воздействие шума  $n(f_\xi)$  на  $\xi$ -е измерение обусловлено ошибками измерительного комплекса и другими экспериментальными погрешностями, а также неточностями, связанными с адекватностью выбранной электродинамической модели реальной физической ситуации.

С учетом этого факта формулы (5) и (6) примут вид

$$\begin{cases} \varepsilon_{rn \text{ exp}} = \frac{\sqrt{P_{ri+1,n}(\theta) + n(f_\xi)} + \sin^2 \theta}{1 + \sin^2 \theta}; \\ h_{ri \text{ exp}} = \frac{\tau_{ri} v_{ri}}{2} + n(f_\xi). \end{cases}$$

Графики зависимостей КОДП  $\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$   $N$  слоев представлены на рис. 4, а, погрешности их оценки – на рис. 4, б. Имитационное моделирование предполагало по 100 реализаций для каждого значения: 1 –  $\varepsilon_{r2 \text{ exp}}$ ; 2 –  $\varepsilon_{r3 \text{ exp}}$ ; 3 –  $\varepsilon_{r4 \text{ exp}}$ ; 4 –  $\varepsilon_{r5 \text{ exp}}$  с увеличением СКО уровня шума  $\sigma$  от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1.

Графики зависимостей измеренных значений глубин  $h_{ri \text{ exp}}$   $N$  слоев представлены на рис. 5, а, погрешности их оценки  $\Delta h_{ri \text{ exp}}$  – на

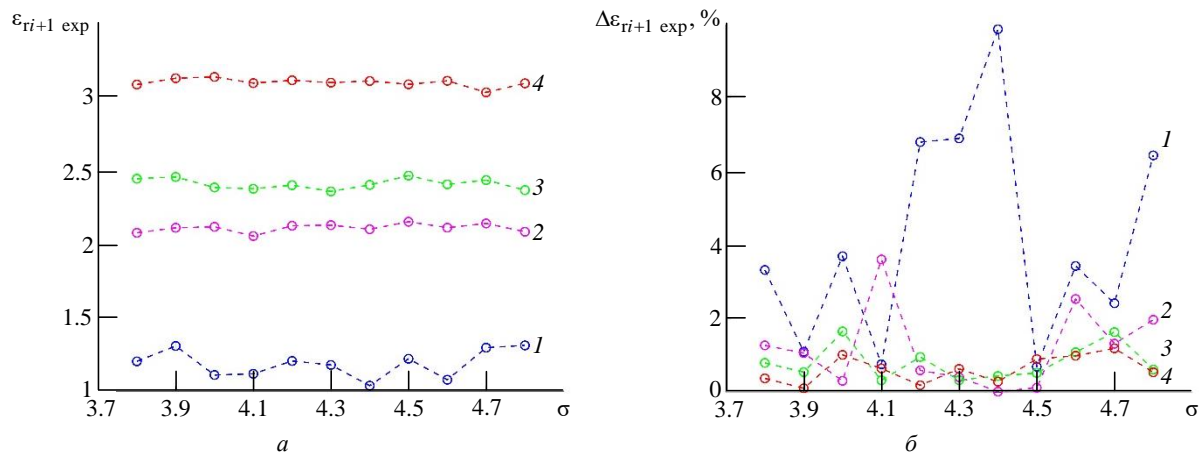


Рис. 4. Измеренные значения КОДП  $\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$   $N$  слоев (а) и погрешности их оценки  $\Delta\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$  (б) при увеличении СКО уровня шума  $\sigma$  от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1

Fig. 4. Measured values of complex relative permittivity  $\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$  for  $N$  layers (a) and the errors of their estimation  $\Delta\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$  (b) upon an increase in RMS from 3.8 to 4.8 in increments of 0.1

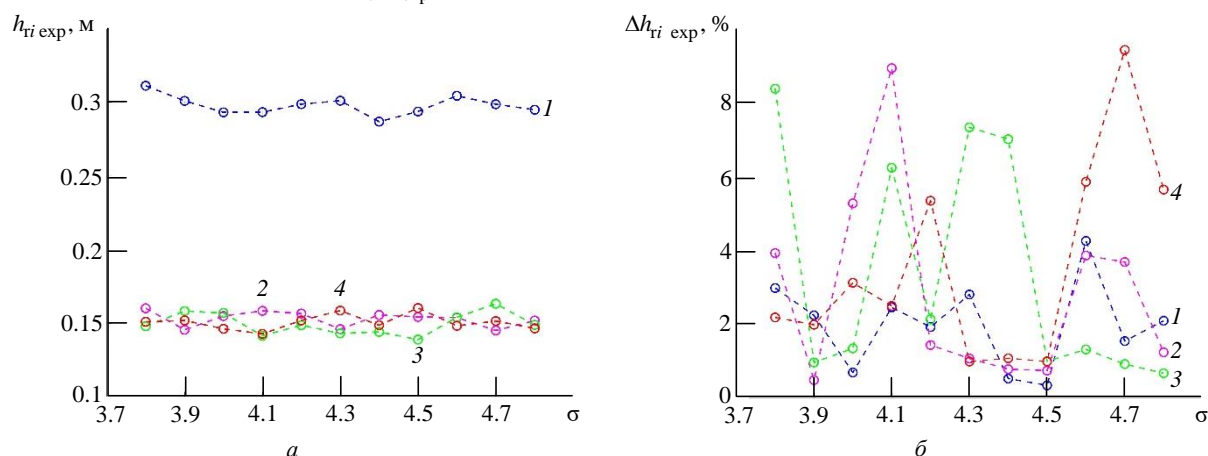


Рис. 5. Измеренные значения глубин  $h_{ri \text{ exp}}$   $N$  слоев (а) и погрешности их оценки  $\Delta h_{ri \text{ exp}}$  (б) при увеличении СКО уровня шума  $\sigma$  от 3.8 до 4.8 с шагом 0.1

Fig. 5. Measured depth values  $h_{ri \text{ exp}}$  for  $N$  layers (a) and the errors of their estimation  $\Delta h_{ri \text{ exp}}$  (b) upon an increase in RMS from 3.8 to 4.8 in increments of 0.1

рис. 5, б. Имитационное моделирование предполагало по 100 реализаций для каждого значения: 1 –  $h_{r2 \text{ exp}}$ ; 2 –  $h_{r3 \text{ exp}}$ ; 3 –  $h_{r4 \text{ exp}}$ ; 4 –  $h_{r5 \text{ exp}}$  с постепенным увеличением СКО уровня шума  $\sigma$  от 3.8 до 4.8 с шагом в 0.1.

Анализ графиков зависимостей (рис. 4 и 5) показал целесообразность применения данного метода, поскольку уровень погрешностей при оценке измеренных значений КОДП  $\varepsilon_{ri+1 \text{ exp}}$  и глубин  $h_{ri \text{ exp}}$   $N$  слоев с вероятностью 0.95 не превышает 10 %.

Внедрение гиросtabilизированной платформы на борту ВСВТ открывает возможности для более точной идентификации слоев снежно-

ледяного покрова. Это достигается за счет более точного расчета угла зондирования поверхности в месте предполагаемой посадки. Расчет осуществляется на основе анализа поляризационных отношений обратного рассеяния сигналов как с вертикальной, так и с горизонтальной поляризациями.

Благодаря усовершенствованию радиолокационной системы подповерхностного зондирования в системе управления посадкой ВСВТ можно будет с большей достоверностью определять структуру снежно-ледяного покрова. Это, в свою очередь, позволит обойтись без присутствия членов экипажа или спасателей на посадочной площадке. В результате повысится уровень безопасности посадки ВСВТ на неподготовленные площадки, покрытые снегом и

льдом, а также улучшатся условия для транспортировки грузов. Неинвазивный метод исследования плоскостойкой среды станет ключевым фактором повышения эффективности и безопасности выполняемых мероприятий.

**Модель функционирования радиолокационной системы подповерхностного зондирования.** Принцип работы радиолокационной системы подповерхностного зондирования основан на использовании сверхширокополосного непрерывного сигнала с линейной частотной модуляцией. При сканировании исследуемого участка, представляющего собой плоскостойкую среду, на различных частотах система улавливает эхосигналы, отраженные от границ слоев. Это становится возможным благодаря различиям в значениях комплексных относительных диэлектрических проницаемостей этих слоев [19].

Передающее устройство генерирует непрерывный ЛЧМ-сигнал [1, 7, 20]:

$$f_{tx}(t) = f_0 + \alpha t_m, \quad 0 < t_m < T_m,$$

где  $f_0$  – начальная частота ЛЧМ-сигнала;  $\alpha$  – крутизна ЛЧМ-сигнала;  $t_m$  – время отдельного периода модуляции;  $T_m$  – период модуляции ЛЧМ-сигнала. В рамках исследования проводится наклонное зондирование снежно-ледяного покрова – конкретного примера плоскостойкой среды.

В приемное устройство поступают отраженные эхосигналы [1, 7, 20]:

$$f_{rx}(t) = f_0 + \alpha(t_m - \tau_{rn}), \quad \tau_{rn} < t_m < T_m,$$

где  $\tau_{rn}$  – временная задержка до границ разде-

ла слоев, определяемая выражением (5) [1, 7, 11, 20, 21].

Частота биения  $f_b$ , зависящая от временной задержки эхосигнала и ширины полосы ЛЧМ-сигнала  $B$  [7, 11, 20], определяется выражением

$$f_b = f_{tx} - f_{rx} = \alpha \tau_{rn} = 2h_{rn} B / (v_{rn} T_m).$$

Толщина слоев плоскостойкой среды вычисляется по выражению [7, 11, 20]

$$h_{rn} = f_b v_{rn} T_m / (2B),$$

из разницы расстояний (см. рис. 3) при распространении электромагнитной волны. Последовательное зондирование под разными углами (в диапазоне от 25 до 75°) позволяет четко выделить отдельные слои в структуре плоскостойкой среды.

Моделирование функционирования радиолокационной системы подповерхностного зондирования выполнено с помощью платформы Enge на языке Julia, предназначенной для различных математических вычислений и динамического моделирования. Непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией формируется в приемопередающем тракте в блоке FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) (рис. 6) с характеристиками:  $f_0 = 2$  ГГц – начальная частота;  $f_1 = 8$  ГГц – конечная частота;  $\alpha = 600$  ГГц – крутизна ЛЧМ-сигнала;  $T_m = 10$  мс – период модуляции ЛЧМ-сигнала; полоса пропускания низкочастотного фильтра 4...400 кГц; частота дискретизации  $f_s = 5$  МГц. Выбор такого сигнала обусловлен, прежде всего, простотой

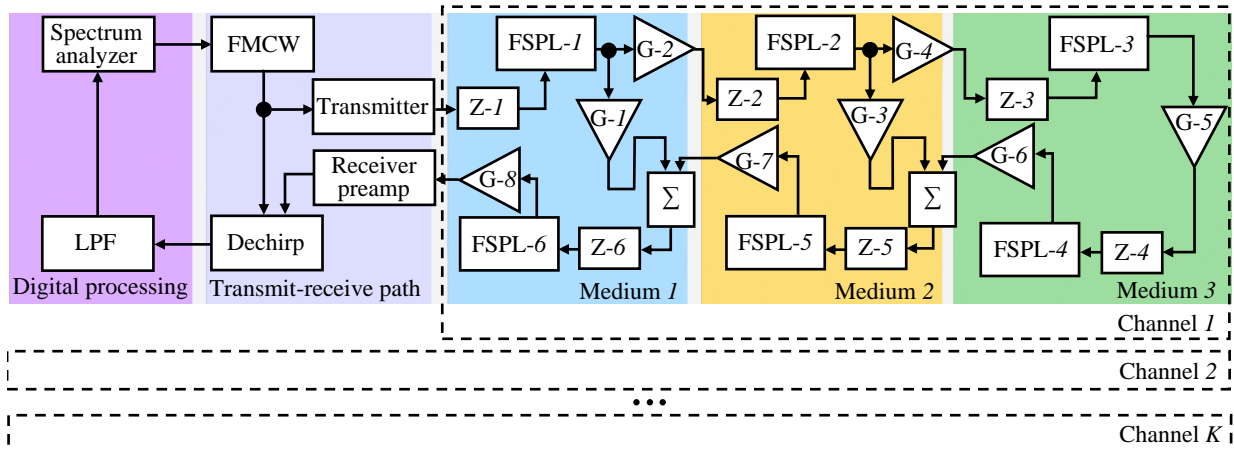


Рис. 6. Модель функционирования радара подповерхностного зондирования

Fig. 6. Simulation of subsurface sensing radar operation

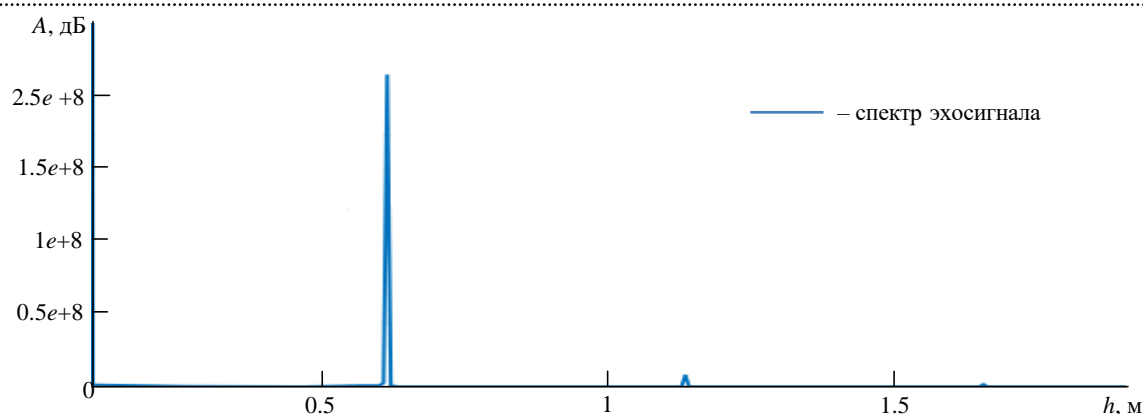


Рис. 7. Спектральная составляющая эхосигнала в зависимости от глубины проникновения

Fig. 7. Spectral component of echo signals depending on penetration depth

его формирования и демодуляции, при этом ширина спектра может достигать сотен мегагерц и даже единиц гигагерц, а после демодуляции не превышает десятков мегагерц. С выхода блока FMCW для усиления сигнал поступает на вход блока передатчика (Transmitter).

Число каналов разрабатываемой радиолокационной системы подповерхностного зондирования определяется количеством видов поляризаций зондируемых и принимаемых ("вертикальная–вертикальная", "горизонтальная–горизонтальная", "вертикальная–горизонтальная", "горизонтальная–вертикальная") сигналов Channel 1, Channel 2, ..., Channel K. В данном случае используется 2 канала сигналов "вертикальная–вертикальная", "горизонтальная–горизонтальная". Сформированный в блоке передатчика Transmitter сигнал проходит через 3 условные среды Medium 1, Medium 2, Medium 3. В их состав входят однотипные блоки: задержки (Z-1–Z-6); затухания эхосигнала Free Space Path Loss (FSPL-1–FSPL-6); усиления сигнала (G-1–G-8); сложения ( $\Sigma$ ). Это позволяет имитировать затухание мощности, выраженное в децибелах (дБ), и задержку эхосигнала при распространении в различных средах [22]. Эхосигналы проходя среды (Medium 1–3) поступают на входы сумматоров и далее на блок предусилителя приемника (Receiver preamp), который уменьшает уровень шума и искажений сигнала. Блок Dechirp выполняет роль квадратурного смесителя для получения разностного сигнала.

С блока Dechirp сигнал через блок фильтра нижних частот (LPF) поступает на анализатор спектра (Spectrum analyzer) для визуализации

работы модели. Таким образом, имитируется отраженный от границ раздела сред эхосигнал в виде спектральных частот, поляризационное отношение амплитуд которых будет исходным для идентификации слоя, а временная задержка – для определения глубины слоя плоскостойкой среды (рис. 7).

В ходе исследования, описанного в [7], были проведены фактические измерения толщины снежного покрова, расположенного поверх морского льда. Анализ полученных данных продемонстрировал, что при применении непрерывного сверхширокополосного сигнала с линейной частотной модуляцией, характеризующегося полосой в 6 ГГц и начальной частотой в 2 ГГц (что соответствует диапазону 3.75...15 см), удастся достичь разрешающей способности по глубине примерно в 4 см.

**Результаты.** На основании предшествующего анализа можно сделать следующие выводы:

1. Разработан инновационный подход для дистанционной оценки состояния плоскостойких сред. Он базируется на изучении соотношения поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния с вертикально и горизонтально ориентированными поляризациями. Метод предполагает решение обратной задачи для воссоздания структуры многослойной среды: через анализ полученных данных косвенным путем вычисляются комплексная относительная диэлектрическая проницаемость и глубина каждого последующего нижележащего слоя, после чего проводится их идентификация.

2. Установлены диапазоны соотношений поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния для вертикальной и горизон-

тальной поляризации, которые коррелируют с диапазонами плотностей слоев снежно-ледяного покрова при определенных углах. Это дает возможность дистанционно оценить состояние плоскостной среды, представленной снежно-ледяным покровом, и восстанавливать его электрофизические и геометрические параметры.

3. Анализ показал, что методическая погрешность при косвенном вычислении комплексной относительной диэлектрической проницаемости слоев с использованием соотношений поляризационных характеристик сигналов обратного рассеяния (с учетом выражений (2)–(4) и предложенного выражения (6)) не превышает 1 %.

4. При использовании метода наклонного зондирования с применением сверхширокополосного непрерывного линейно-частотно-модулированного сигнала в диапазоне от 2 до 8 ГГц достигается разрешающая способность по глубине примерно 4 см.

**Заключение.** Разработка неинвазивного метода исследования плоскостных сред посредством изучения поляризационных характеристик обратнорассеянного радиосигнала от-

крывает новые возможности в оценке снежно-ледяного покрова. Благодаря этому подходу становится возможным детально выявлять структурные элементы покрова, что, в свою очередь, позволяет автоматизировать процедуру анализа пригодности неподготовленных и неразведанных заснеженных площадок или водоемов со снежно-ледяным покровом для посадки вертолетов. Такая автоматизация критически важна для оптимизации логистических операций – транспортировки грузов и людей, эвакуации пострадавших, проведения поисково-спасательных миссий и других задач.

Применение данной технологии позволяет существенно сократить время, необходимое для принятия решения о посадке, и в значительной мере повысить уровень безопасности подобных мероприятий.

Отличительная черта предложенного метода – способность распознавать все слои в многослойной среде [23], в то время как существующие методы, как правило, ограничиваются анализом лишь приповерхностного слоя [9, 10, 24, 25].

#### Список литературы

1. Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 288 с.

2. Машков В. Г., Малышев В. А., Прохорский Р. А. Концепция обеспечения безопасной посадки воздушного судна вертолетного типа военного назначения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 76–89.

3. Машков В. Г., Малышев В. А. Модель управления посадкой воздушного судна вертолетного типа на неподготовленную заснеженную площадку // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 4. С. 1–10. doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037

4. Машков В. Г., Малышев В. А. Модель управления посадкой воздушного судна вертолетного типа на водоем со снежно-ледяным покровом // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 3. С. 1–9. doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.017

5. Пат. RU 2707275. Способ выбора площадки для посадки воздушного судна вертолетного типа / В. Г. Машков, В. А. Малышев. Оpubл. 26.11.2019. Бюл. № 33.

6. Пат. RU 2737761. Способ оценки возможности посадки воздушного судна вертолетного типа на водоем со снежно-ледяным покровом / В. Г. Маш-

ков, В. А. Малышев, Р. А. Прохорский. Оpubл. 02.12.2020. Бюл. № 34.

7. Sudarsan Krishnan. Modeling and simulation analysis of an FMCW radar for measuring snow thickness. URL: [https://itc.ku.edu/research/thesis/documents/sudarsan\\_krishnan\\_thesis.pdf](https://itc.ku.edu/research/thesis/documents/sudarsan_krishnan_thesis.pdf) (дата обращения: 15.01.2025).

8. Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. № 128 "Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации РФ". URL: <https://base.garant.ru/196235/> (дата обращения: 15.01.2025).

9. Пат. RU 2623668. Способ дистанционного определения относительной диэлектрической проницаемости среды под границей атмосфера-океан / А. С. Запечалов. Оpubл. 28.06.2017. Бюл. № 19.

10. Пинчук А. Н. Влияние поляризации зондирующего радиосигнала на эффективность выделения отклика надводной цели // Наука и образование. МГТУ им. Баумана. 2015. № 3. С. 140–152. doi: 10.7463/0315.0760670

11. Малышев В. А., Машков В. Г. Скорость распространения электромагнитной волны в снежно-ледяной подстилающей поверхности // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 3 (5). С. 40–54. doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05

12. Глазовский А. Ф., Мачерет Ю. Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.

13. Macheret Ju. Ja., Glazovsky A. F. Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers from radar sounding data // *Polar Research*. 2000. Vol. 19, № 2. P. 205–216.

doi: 10.1111/j.1751-8369.2000.tb00344.x

14. Мачерет Ю. Я. Оценка содержания воды в ледниках по гиперболическим отражениям // *Материалы гляциологических исследований*. 2000. № 89. С. 3–10.

15. Гринев А. Ю., Темченко В. С., Багно Д. В. Радары подповерхностного зондирования. Мониторинг и диагностика сред и объектов. М.: Радиотехника, 2013. 391 с.

16. Казьмин А. И., Федюнин П. А. Восстановление структуры электрофизических параметров многослойных диэлектрических материалов и покрытий по частотной зависимости коэффициента ослабления поля поверхностной электромагнитной волны // *Измерительная техника*. 2019. № 9. С. 39–45.

doi: 10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45

17. Федюнин П. А., Казьмин А. И., Манин В. А. СВЧ-способ дефектоскопии радиопоглощающих покрытий и устройство для его реализации // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 11. С. 32–39.

doi: 10.14489/td.2017.11.pp.032-039

18. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

19. Пат. RU 2262718. Способ измерения толщины снежного покрова / Е. Л. Шошин, А. М. Суханюк, И. И. Плюснин. Опубл. 20.10.2005. Бюл. № 29.

20. Машков В. Г. Метод дистанционной идентификации состояния снежно-ледяного покрова по отношениям коэффициентов отражения Френеля // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2020. Т. 23, № 5. С. 46–56.

doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-46-56

21. Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове / В. М. Котляков, Ю. Я. Мачерет, А. В. Сосновский, А. Ф. Глазовский // *Лед и снег*. 2017. Т. 57, № 1. С. 45–56.

doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56

22. Машков В. Г., Мальшев В. А. Обеспечение безопасной посадки воздушного судна вертолетного типа в условиях недостаточной информативности закабинной обстановки. М.: Радиотехника, 2022. 304 с.

23. Пат. RU 2852744. Устройство выбора площадки при посадке по-вертолетному / В. Г. Машков, А. Е. Милях. Опубл. 15.12.2025. Бюл. № 35.

24. О возможности определения диэлектрической проницаемости верхних слоев подстилающих сред по измеренным коэффициентам отражения при наклонном зондировании плоскими волнами вертикальной и горизонтальной поляризации в СВЧ-диапазоне / А. С. Шостак, В. В. Загоскин, С. П. Лукьянов, А. С. Карауш // *Журн. радиоэлектроники*. 1999. № 11. С. 1–12.

25. Пат. RU 2613810. Способ измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости материала с потерями в СВЧ-диапазоне / Г. Г. Валеев. Опубл. 21.03.2017. Бюл. № 9.

### Информация об авторах

**Машков Виктор Георгиевич** – доктор технических наук (2023), доцент (2017), доцент кафедры эксплуатации радиотехнических средств (обеспечения полетов) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор 360 научных работ. Сфера научных интересов – подповерхностная радиолокация и радиовидение.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: mvglaze@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3406-7444>

**Милях Александр Евгеньевич** – инженер специальных радиотехнических систем (2018, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина"), адъюнкт кафедры эксплуатации радиотехнических средств (обеспечения полетов) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор 14 научных публикаций. Сфера научных интересов – подповерхностная радиолокация и радиовидение.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: j.milyah@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-6949-3671>

**Рябев Виктор Иванович** – инженер автоматизированных систем управления (2012, Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова), адъюнкт кафедры эксплуатации радиотехнических средств (обеспечения полетов) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", (Воронеж). Автор 28 научных публикаций. Сфера научных интересов – подповерхностная радиолокация и радиовидение.

Адрес: Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: ryabev@list.ru

<https://orcid.org/0009-0009-6911-3497>

## References

1. Kuprjashkin I. F., Lihachev V. P., Rjazancev L. B. *Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem* [Small-Sized Multifunctional Radars with Continuous Frequency-Modulated Radiation]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2020, 288 p. (In Russ.)
2. Mashkov V. G., Malyshev V. A., Prohorskiy R. A. The Military Helicopter Type Aircraft Safe Landing Providing Concept. *Vozdushnokosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. 2020, no. 16, pp. 76–89. (In Russ.)
3. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Model Helicopter-Type Aircraft Landing Control on an Unprepared Snow-Covered Area. Modeling, Optimization and Information Technology. 2019, vol. 7, no. 4, pp. 1–10. (In Russ.)  
doi: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.037
4. Mashkov V. G., Malyshev V. A. Model Helicopter-Type Aircraft Landing Control on a Water Body with Snow-Ice Cover. Modeling, Optimization, and Information Technology. 2020, vol. 8, no. 3, pp. 1–9. (In Russ.)  
doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.017
5. Mashkov V. G., Malyshev V. A. *Sposob vybora ploshhadki dlja posadki vozdushnogo sudna vertoletnogo tipa* [The Method of Selecting a Landing Site for a Helicopter-Type Aircraft]. Pat. RF, no. 2707275, 2019. (In Russ.)
6. Mashkov V. G., Malyshev V. A., Prohorskiy R. A. *Sposob ocenki vozmozhnosti posadki vozdushnogo sudna vertoljotnogo tipa na vodojom so snezhno-ledjanyim pokrovom* [A Method for Assessing the Possibility of Landing a Helicopter-Type Aircraft on a Body of Water with Snow and Ice Cover]. Pat. RF, no. 2737761, 2020. (In Russ.)
7. Sudarsan Krishnan. Modeling and simulation analysis of an FMCW radar for measuring snow thickness. Electronics and communication engineering. Available at: [https://itc.ku.edu/research/thesis/documents/sudarsan\\_krishnan\\_thesis.pdf](https://itc.ku.edu/research/thesis/documents/sudarsan_krishnan_thesis.pdf) (accessed: 15.01.2025).
8. The Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 31, 2009 No. 128 "On approval of the Federal Aviation Regulations "Preparation and performance of flights in civil aviation of the Russian Federation". Available at: <https://base.garant.ru/196235/> (accessed: 15.01.2025).
9. Zapevalov A.S. *Sposob distancionnogo opredelenija odnositel'noj dijelektricheskoj pronicaemosti sredy pod granicej atmosfera-okean* [A Method for Remotely Determining the Relative Permittivity of a Medium under the Atmosphere-Ocean Boundary]. Pat. RF, no. 2623668, 2017. (In Russ.)
10. Pinchuk A.N. The Probing Radio Signal Polarization Effect on Separation Efficiency of Surface Target Response. Science and Education of the Bauman MSTU. 2015, no. 3, pp. 140–152. (In Russ.)  
doi: 10.7463/0315.0760670
11. Malyshev V. A., Mashkov V. G. The Speed Electromagnetic Wave Propagation in the Snow-Ice Underlying Surface. Radioengineering. 2020, vol. 84, no. 3 (5), pp. 40–54. (In Russ.)  
doi: 10.18127/j00338486-202003(05)-05
12. Glazovskij A. F., Macheret Ju. Ja. *Voda v lednikah. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distancionnyh issledovanij* [Water in Glaciers. Methods and Results of Geophysical and Remote Studies]. Moscow, *GEOS*, 2014, 528 p. (In Russ.)
13. Macheret Ju. Ja., Glazovsky A. F. Estimation of Absolute Water Content in Spitsbergen Glaciers From Radar Sounding Data. Polar Research. 2000, vol. 19, no. 2, pp. 205–216.  
doi: 10.1111/j.1751-8369.2000.tb00344.x
14. Macheret Yu. Ya. Estimation of Water Content in Glaciers by Hyperbolic Reflections. Glaciological Research Materials. 2000, no. 89, pp. 3–10. (In Russ.)
15. Grinev A. Ju., Temchenko V. S., Bagno D. V. *Radary podpoverxnostnogo zondirovanija. Monitoring i diagnostika sred i ob'ektov* [Subsurface Sensing Radars. Monitoring and Diagnostics of Facility Environments]. Moscow, *Radiotekhnika*, 2013, 391 p. (In Russ.)
16. Kaz'min A. I., Fedjunin P. A. Restoration of the Structure of Electrophysical Parameters of Multilayer Dielectric Materials and Coatings Based on the Frequency Dependence of the Field Attenuation Coefficient of a Surface Electromagnetic Wave. Measurement Techniques. 2019, no. 9, pp. 39–45. (In Russ.)  
doi: 10.32446/0368-1025it.2019-9-39-45
17. Fedjunin P. A., Kaz'min A. I., Manin V. A. Microwave Method of Flaw Detection of Radio-Absorbing Coatings and a Device for Its Implementation. Testing. Diagnostics. 2017, no. 11, pp. 32–39. (In Russ.)  
doi: 10.14489/td.2017.11.pp.032–039
18. Brehovskih L. M. *Volny v sloistyh sredah* [Waves in Layered Media]. Moscow, *Nauka*, 1973, 343 p. (In Russ.)
19. Shoshin E. L., Suhanjuk A. M., Pljusnin I. I. *Sposob izmerenija tolshhiny snezhnogo pokrova* [The Method of Measuring the Thickness of the Snow Cover]. Pat. RF, no. 2262718, 2005. (In Russ.)
20. Mashkov V. G. Method for Remote State Identification Snow-Ice Cover by the Ratio of Fresnel Reflection Coefficients. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 5, pp. 46–56. (In Russ.)  
doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-46-56
21. Kotljakov V. M., Macheret Ju. Ja., Sosnovskij A. V., Glazovskij A. F. Speed of Radio Wave Propagation in Dry and Wet Snow. Ice and Snow. 2012, vol. 57, no. 1, pp. 45–56. (In Russ.)  
doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56
22. Mashkov V. G., Malyshev V. A. *Obespechenie bezopasnoj posadki vozdushnogo sudna vertoletnogo tipa v usloviyah nedostatochnoj informativnosti zakabinnoj obstanovki* [Ensuring of Helicopter Type Aircraft Safety Landing Under the Conditions of Insufficient External Information Content]. Moscow, *Radioelekhnika*, 2022, 304 p. (In Russ.)
23. Mashkov V. G., Milyah A. E. *Ustrojstvo vybora ploshhadki pri posadke po-vertolyotnomu* [Helicopter Landing Site Selection Device]. Pat. RF, no. 2852744, 2025. (In Russ.)

24. Shostak A. S., Zagoskin V. V., Luk'janov S. P., Karaush A. S. On the Possibility of Determining the Dielectric Constant of the Upper Layers of the Underlying Media from the Measured Reflection Coefficients During Inclined Sounding by Plane Waves of Vertical and Horizontal Polarization in the Microwave Range. *J. of Radio Electronics*. 1999, no. 11, pp. 1–12. (In Russ.)

25. Valeev G. G. *Sposob izmerenija odnositel'noj kompleksnoj dijelektricheskoy pronicaemosti materiala s poterjami v SVCh diapazone* [A method for Measuring the Relative Complex Dielectric Constant of a Material with Losses in the Microwave Range]. Pat. RF, no. 2613810, 2017. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Viktor G. Mashkov**, Dr Sci. (Eng.) (2023), Associate Professor (2017), Associate Professor of the Department of Operation radio equipment (flight support) of Military Educational-Research Centre "Air Force of Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). The author of 360 scientific publications. Area of expertise: subsurface radar and radio vision.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A, Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: mvgblaze@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3406-7444>

**Aleksandr E. Milyah**, Engineer of Special Radio Engineering Systems (2018, Military Educational-Research Center "Air Force of Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin"), adjunct of the Department of Operation radio equipment (flight support) of Military Educational-Research Centre "Air Force of Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). The author of 14 scientific publications. Area of expertise: subsurface radar and radio vision.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A, Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: j.milyah@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-6949-3671>

**Viktor I. Ryabev**, Engineer of Automated Control Systems (2012, Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov Military Academy of Aerospace Defense), adjunct of the Department of Operation radio equipment (flight support) of Military Educational-Research Centre "Air Force of Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). The author of 28 scientific publications. Area of expertise: subsurface radar and radio vision.

Address: Military Educational-Research Centre Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", 54A, Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

E-mail: ryabev@list.ru

<https://orcid.org/0009-0009-6911-3497>

---

## Определение коэффициента масштабирования в системе интеграции инфракрасной системы и ORB-SLAM

А. М. Боронахин<sup>1</sup>, Нгуен Куок Хань<sup>2✉</sup>

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

<sup>2</sup>Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона, Ханой, Вьетнам

✉ [nguyenquockhanh183@gmail.com](mailto:nguyenquockhanh183@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Интерес к исследованиям автономных малогабаритных транспортных устройств в последние годы стремительно растет, при этом задачи навигации являются ключевыми и первоочередными для их решения. В условиях внешней среды использование глобальной спутниковой навигационной системы остается оптимальным решением благодаря широкому покрытию, автоматичности и простоте применения. Однако движение в неизвестных и GPS-недоступных средах, таких как помещения, остаются открытой научной задачей. Система Valve Lighthouse была предложена для навигации транспортных устройств в ограниченных пространствах благодаря высокой степени автоматизации, низкой стоимости, простоте развертывания, а также крайне компактным сенсорам, устанавливаемым на устройство, что делает ее особенно подходящей для малогабаритных транспортных устройств. Однако, как и другие системы навигации в помещении, Lighthouse не позволяет строить карту неизвестной среды (обнаруживать препятствия), что может приводить к столкновениям и повреждению устройства. Поэтому интеграция с системой построения карты является необходимой. В настоящее время оптимальным выбором для малогабаритных устройств является ORB-SLAM на основе монокулярной камеры. Единственным существенным недостатком монокулярных систем является невозможность определения коэффициента масштаба карты. С этой целью в данной статье предлагается алгоритм определения коэффициента масштаба карты системы ORB-SLAM при ее интеграции с инфракрасной системой.

**Цель работы.** Определение коэффициента масштаба карты системы ORB-SLAM в интегрированной системе с инфракрасной системой.

**Материалы и методы.** Предложенный метод основан на адаптивном расширенном фильтре Калмана с окном "Sage" в сочетании с методом оценки максимального правдоподобия.

**Результаты.** Предложенный алгоритм позволяет в реальном времени определять коэффициент масштаба карты системы ORB-SLAM по каждой оси.

**Заключение.** Предлагается алгоритм определения коэффициента масштаба карты системы ORB-SLAM по каждой оси в реальном времени в составе интегрированной системы с инфракрасной системой Valve Lighthouse.

**Ключевые слова:** коэффициент масштаба, ORB-SLAM, инфракрасная система

**Для цитирования:** Боронахин А. М., Нгуен Куок Хань. Определение коэффициента масштабирования в системе интеграции инфракрасной системы и ORB-SLAM // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 64–78.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-64-78

---

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

Статья поступила в редакцию 22.01.2026; принята к публикации после рецензирования 13.03.2026; опубликована онлайн 30.04.2026

---

## Determination of the Scale Factor in an Integrated Infrared and ORB-SLAM System

Alexander M. Boronakhin<sup>1</sup>, Nguyen Quoc Khanh<sup>2</sup>✉

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

<sup>2</sup>Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

✉ nguyenquockhanh183@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Recent years have seen an increased interest in research on small autonomous vehicles, in which navigation are the fundamental problems that must be addressed. In outdoor environments, the use of global satellite navigation systems remains the optimum solution due to their wide coverage, high level of automation, and ease of use. However, operation in unknown and GPS-denied environments, such as indoor spaces, is still a relevant research problem. The Valve Lighthouse (LH) system has been proposed for guiding mobile platforms in confined spaces due to its autonomous operation, low cost, ease of deployment, and miniature onboard sensors, which are particularly suitable for small-scale vehicles. Nevertheless, similar to other indoor localization sensors, the LH system does not allow the reconstruction of an unknown environment (i.e., obstacle detection), which may lead to collisions and potential damage to the vehicle. Therefore, integration with a mapping system is necessary. Currently, an optimal choice for small-scale platforms is ORB-SLAM based on a monocular camera. The main drawback of monocular camera-based systems lies in their inability to determine the scale factor of the map. In this regard, this paper proposes an algorithm to estimate the map scale factor of the ORB-SLAM system through its integration with an infrared system.

**Aim.** Determination of the map scale factor of the ORB-SLAM system in an integrated infrared system.

**Materials and methods.** The proposed algorithm is based on an extended adaptive Kalman filter with a Sage window combined with a maximum likelihood estimation method.

**Results.** The proposed algorithm enables the determination of the map scale factor of the ORB-SLAM system along each axis in real time.

**Conclusion.** An algorithm is proposed to determine the map scale factor of the ORB-SLAM system along each axis in real time within a system integrated with the Valve Lighthouse infrared system.

**Keywords:** scale factor, ORB-SLAM, infrared system

**For citation:** Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh. Determination of the Scale Factor in an Integrated Infrared and ORB-SLAM System. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 64–78.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-64-78

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

Submitted 22.01.2026; accepted 13.03.2026; published online 30.04.2026

**Введение.** В последнее время растет интерес к исследованиям автономных транспортных устройств, особенно малых устройств. Основными преимуществами этих транспортных устройств являются возможность гибкого маневрирования в движении [1], а также совместная работа для решения сложных задач в труднодоступных средах, куда человеку непросто добраться [2–6]. Основные задачи малых транспортных средств (МТС) обычно включают наблюдение, разведку, исследование и изучение. Поэтому навигация является первоочередной задачей для обеспечения высокой эф-

фективности выполнения этих миссий.

Для внешней среды использование глобальных навигационных спутниковых систем является оптимальным решением благодаря широкому покрытию, автоматизации и простоте использования. Однако движение в неизвестных средах и в помещениях без GPS остается открытой проблемой. В настоящее время для решения задачи навигации в помещениях разработано множество альтернативных подходов [7]. Среди них можно выделить такие технологии, как оптический поток, инерциальные навигационные системы (ИНС) и ультразвуко-

вые системы. Тем не менее каждая из перечисленных технологий имеет определенные ограничения, такие как недостаточная точность, высокие требования к вычислительным ресурсам и накопление погрешностей с течением времени. Кроме того, особенности закрытых помещений с ограниченным пространством и высокой плотностью препятствий предъявляют требования к минимизации размеров транспортного устройства. Потребность в простой, точной (в пределах сантиметров) и компактной системе для навигации в помещении является актуальной задачей, требующей дальнейших исследований и разработки.

В последнее время навигация с использованием инфракрасной системы Valve Lighthouse привлекает большое внимание. Изначально система была разработана для приложений виртуальной реальности. Однако благодаря множеству преимуществ, таких как низкая стоимость, простота развертывания, удобство транспортировки и использования, компактные датчики, подходящие для малых устройств, система была внедрена для задач навигации в помещении для транспортных средств (ТС) [8–10]. В [11] Т. Арно и соавторы реализовали систему позиционирования в помещении для беспилотных летательных аппаратов, используя одну или две станции Lighthouse. Точность системы Valve Lighthouse была проверена в экспериментах [12–14]. В предыдущих исследованиях были разработаны алгоритмы для минимизации погрешностей системы, вызванных погрешностями установки базовых станций, до уровня 1...2 см, что соответствует требованиям навигации в помещениях.

Подобно ранее рассмотренным навигационным системам в помещении, одним из присущих недостатков этой системы в задаче навигации в помещении является неспособность определять неизвестную среду, что может привести к столкновениям и повреждению устройства. Это требует интеграции с методом определения и картографирования неизвестной среды в реальном времени. На данный момент оптимальным выбором является метод одновременного позиционирования и построения карты (SLAM). Для этого метода были исследованы различные датчики, такие как лазерные

сканеры (Lidar) [15], монокулярные камеры [16], стереокамеры [17]. Среди них монокулярные камеры являются наиболее подходящими для МТС по следующим причинам:

- низкое энергопотребление, компактные размеры и низкая стоимость;
- система SLAM с одной камерой не ограничена внутренним полем зрения, что позволяет работать даже в очень узких пространствах [18].

Однако недостатком этой системы является невозможность определения масштабного коэффициента карты из-за отсутствия информации о глубине в изображении, поэтому требуется интеграция с внешними системами для определения истинного масштаба карты (в данном случае – инфракрасная система Valve Lighthouse). Методы определения масштабного коэффициента были представлены во многих публикациях, таких как [18], где предложен замкнутый оценщик масштабного коэффициента на основе статистической модели. В [19] масштабный коэффициент вводится в расширенный фильтр Калмана как дополнительная переменная состояния. Однако в этих публикациях масштабный коэффициент обычно рассматривается как постоянный, а случайная погрешность коэффициента – как неизменная на протяжении всего времени. На практике же существует два этапа: нестабильного масштабного коэффициента на малых координатах и стабильного коэффициента после того, как устройство прошло достаточное расстояние.

Поэтому в данном исследовании авторы предлагают систему определения масштабного коэффициента в реальном времени по каждой оси, с использованием расширенного адаптивного фильтра Калмана с окном "Sage" и методом максимально правдоподобной оценки.

**Система позиционирования Lighthouse.** Система, разработанная компанией Valve Corporation, изначально была создана для виртуальной реальности, однако в последние годы она стала использоваться как высокоточное решение для пространственного позиционирования в робототехнике и управлении ТС в помещении. При применении для навигации ТС система работает на основе базовых станций (рис. 1), которые излучают лазерные сигналы, непрерывно сканирующие пространство, в то

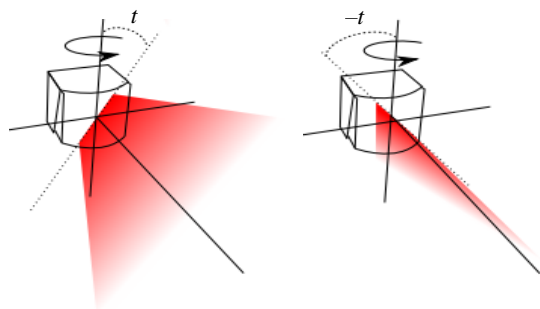


Рис. 1. Базовая станция  
 Fig. 1. Basestation

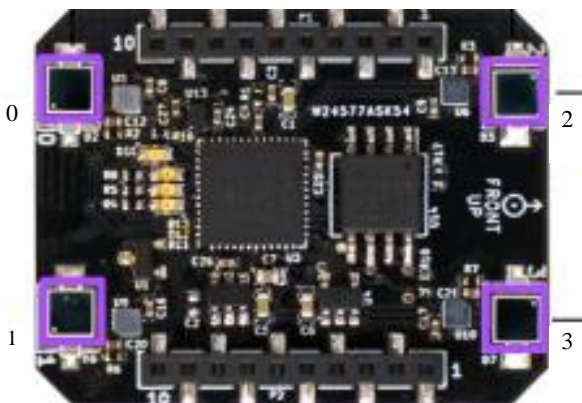


Рис. 2. Сенсорная плата  
 Fig. 2. Sensor deck

время как датчики (0–3), установленные на дроне (рис. 2), принимают эти сигналы для вычисления своего положения и ориентации в реальном времени [11].

Такой подход позволяет ТС определять координаты с точностью, достигающей миллиметрового уровня при идеальных условиях. Благодаря этому система позиционирования Lighthouse становится эффективной альтернативой GPS в помещении, где спутниковый сигнал недоступен или нестабилен, а также может конкурировать с дорогостоящими системами захвата движения, такими как Vicon или OptiTrack.

**Алгоритм определения положения ТС** в системе Lighthouse основан на нахождении угла вращения вращающегося барабана  $\alpha_{i,j}$  (рис. 3), который теоретически описывается двумя составляющими  $\alpha_s$  и  $\alpha_t$  по следующей формуле:

$$\alpha_{i,j} = \alpha_s + \alpha_t = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{Y_2^{D_i}}{X_2^{D_i}} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{Z_2^{D_i} \operatorname{tg}(\beta_j)}{\sqrt{(X_2^{D_i})^2 + (Y_2^{D_i})^2}} \right),$$

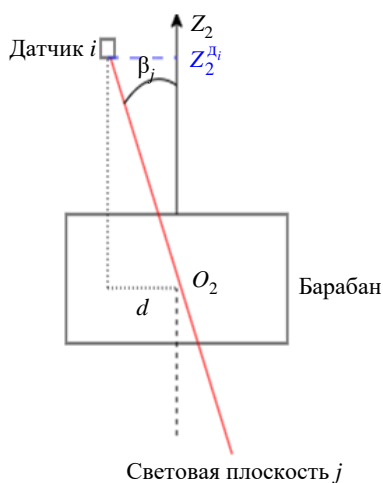
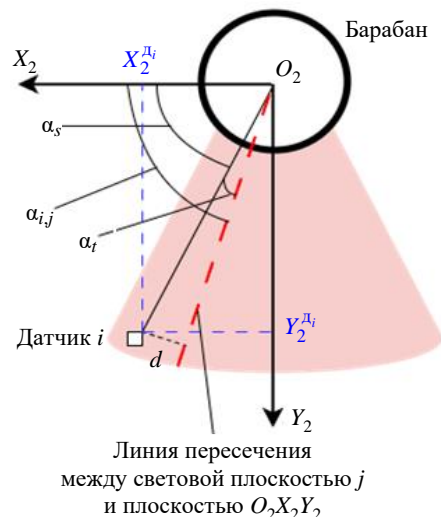


Рис. 3. Принцип работы системы  
 Fig. 3. Operating principle of the system

где  $[X_2^{D_i}, Y_2^{D_i}, Z_2^{D_i}]^T = P_2^{D_i}$  – координаты датчика  $i$  в системе координат, связанной с базовой станцией;  $\alpha_s$  – угол между  $O_2X_2$  и проекцией  $O_2$  – датчик на плоскость  $O_2X_2Y_2$ ;  $\alpha_t = \alpha_{i,j} - \alpha_s$ ;  $i$  – индекс датчиков (1–4);  $j$  – индекс световых плоскостей (1–2);  $\beta_j$  – угол наклона световой плоскости относительно оси  $O_2Z_2$ .

Из соотношения между координатами датчика  $P_2^{D_i}$  и координатами ТС  $P_2^{об}$  в системе координат, связанной с базовой станцией, определяется соотношение между углом вращения барабана  $\alpha_{i,j}$  и координатами ТС  $P_2^{об}$ . Положение ТС определяется методом Ньютона по следующему выражению для невязки:

$$u_{i,j} = \bar{\alpha}_{i,j} - \alpha_{i,j},$$

где  $\bar{\alpha}_{i,j}$  – значение угла, полученного датчиком от базовой станции.

Положение объекта определяется методом Ньютона по шагам:

$$P_{2,k+1}^{об} = P_{2,k}^{об} - (JJ^T)^{-1} J^T U,$$

где  $J = \frac{\partial U}{\partial P_2^{об}}$ ;  $U_{8 \times 1} = [u_{i,j}]$ .

Далее рассмотрим ORB-SLAM и принцип ее работы.

**ORB-SLAM** – это мощный метод SLAM, который использует постоянные скорость и вращения для выделения особых точек на изображениях. ORB-SLAM позволяет в режиме реального времени искать характеристики ORB на поверхности изображения и использовать их в качестве ключевых точек для расчета положения и ориентации камеры [20].

Система состоит из 3 основных потоков: мониторинга, локального картирования и замыкания контура (рис. 4). Последовательность изображений будет последовательно поступать на обработку. Поток мониторинга определяет

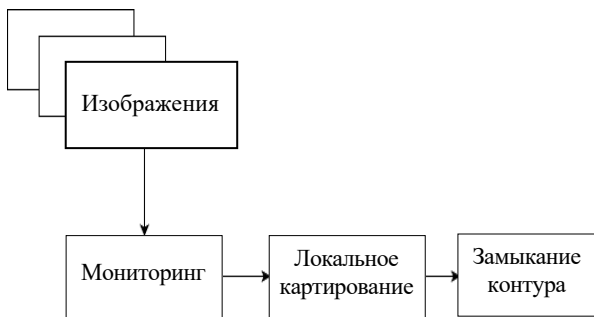


Рис. 4. Принцип работы ORB-SLAM

Fig. 4. Operating principle of ORB-SLAM

локальное положение камеры на основе идентификации ключевых кадров. Характеристики корреляции подкадров по отношению к основным кадрам оптимизируются посредством автоматической коррекции луча при движении. Поток локального картирования использует граф совместимости для создания локальной карты. Функции ORB триангулируются и сопоставляются с ближайшим ключевым кадром на графике совместимости. Если точка карты встречается более чем в 25 % кадров и встречается как минимум в 3 ключевых кадрах, она будет добавлена на локальную карту. Поток замыкания цикла позволяет повторно оптимизировать местоположения и точки на карте, используя RANSAC и методы коррекции луча [21].

На рис. 5 представлен наглядный принцип работы системы.

**Интеграция системы Lighthouse и системы ORB-SLAM.** Система, интегрирующая инфракрасную систему Lighthouse и систему ORB-SLAM, представлена на схеме на рис. 6. При этом обе системы преобразуются в одну локальную систему координат 1, поскольку система ORB-SLAM принимает координаты, связанные с устройством в начальный момент, в качестве исходной системы координат. Достаточно на первом шаге настроить устройство так, чтобы оно находилось в начале координат локальной системы. Таким образом, система координат ORB-SLAM совпадает с локальной системой координат.

Теперь необходимо преобразовать систему координат 2, связанную с базовой станцией, в локальную систему 1. Базовая станция будет установлена на фиксированном возвышении. Система Lighthouse определяет положение МТС в системе координат, прикрепленной к базовой станции. Для навигации и ориентации МТС в определенном пространстве требуется

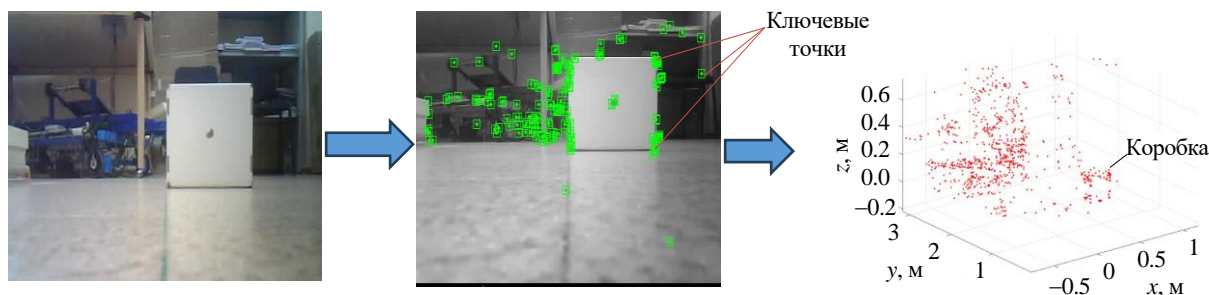


Рис. 5. Наглядный принцип работы системы

Fig. 5. Visual representation of the system operation

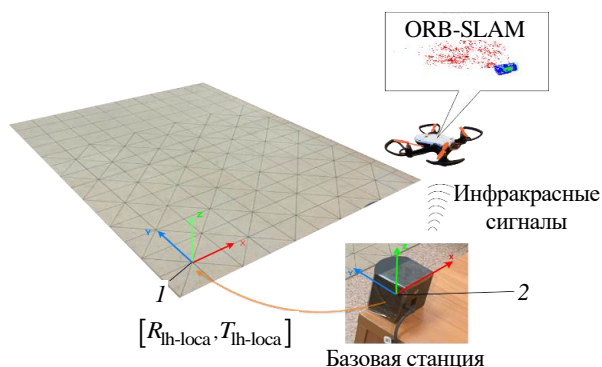


Рис. 6. Интеграция системы Lighthouse и системы ORB-SLAM  
 Fig. 6. Integration of the Lighthouse and ORB-SLAM systems

калибровка системы, прикрепленной к базовой станции, по сравнению с локальной системой координат. Этот процесс осуществляется по следующей математической модели:

$$\begin{bmatrix} x^{lh} \\ y^{lh} \\ z^{lh} \end{bmatrix} = [R_{lh-local} \quad T_{lh-local}] * \begin{bmatrix} x_0^{lh} \\ y_0^{lh} \\ z_0^{lh} \end{bmatrix},$$

где  $x^{lh}$ ,  $y^{lh}$ ,  $z^{lh}$  – координаты, определенные инфракрасной системой, преобразуются в локальную систему координат;  $x_0^{lh}$ ,  $y_0^{lh}$ ,  $z_0^{lh}$  – координаты в инфракрасной системе Lighthouse;  $[R_{lh-local} \quad T_{lh-local}]$  – матрица преобразования.

Одним из оптимальных методов калибровки между двумя системами координат является метод PnP. Метод использует набор точек в локальной системе координат и соответствующие им позиции в системе координат, прикрепленной к базовой станции, для определения относительного положения базовой станции в локальной системе координат в виде вращения и перемещения. Нелинейная задача в методе оптимизируется с помощью алгоритма Левенберга–Маркварда.

**Определение коэффициента масштаба карты ORB-SLAM.** Масштаб карты представляет собой соотношение между картой, построенной системой ORB-SLAM, и реальной картой. При интеграции с инфракрасной системой масштаб может быть определен по следующему уравнению:

$$k^x = \frac{x^{slam}}{x^{lh}}; k^y = \frac{y^{slam}}{y^{lh}}; k^z = \frac{z^{slam}}{z^{lh}}, \quad (1)$$

где  $k^x$ ,  $k^y$ ,  $k^z$  – коэффициенты масштаба по каждой оси;  $x^{slam}$ ,  $y^{slam}$ ,  $z^{slam}$  – координаты устройства, определенные ORB-SLAM в локальной системе координат;  $x^{lh}$ ,  $y^{lh}$ ,  $z^{lh}$  – координаты устройства, определенные инфракрасной системой в локальной системе координат.

Из-за схожести осей в статье рассматривается только определение коэффициента масштаба одной оси, в данном случае оси  $OY$ . Для оценки коэффициента масштаба по (1) при движении устройства проводится наблюдение, как показано на рис. 7, при котором устройство перемещается параллельно оси  $OY$ , а коэффициент масштаба вычисляется в реальном времени по (1) (рис. 8). Для оценки точности коэффициента масштаба координаты объекта (бумажной коробки) определяются с помощью системы ORB-SLAM и умножаются на коэффициент масштаба, после чего сравниваются с истинными координатами (рис. 8).

Можно оценить, что в процессе движения устройства параллельно оси  $OY$  (с увеличением координаты по оси  $OY$ ) коэффициент масштаба изменяется в определенном направлении (уменьшается), и когда устройство достигает определенной координаты, коэффициент масштаба стабилизируется, а его среднее значение стремится к фиксированному. Одновременно при наблюдении графика координат объекта

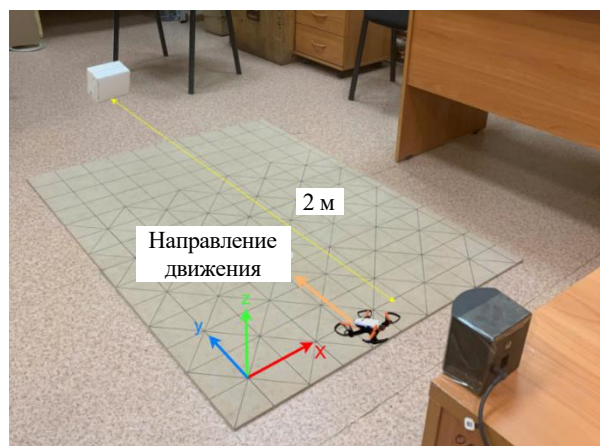


Рис. 7. Установка экспериментов  
 Fig. 7. Experimental setup

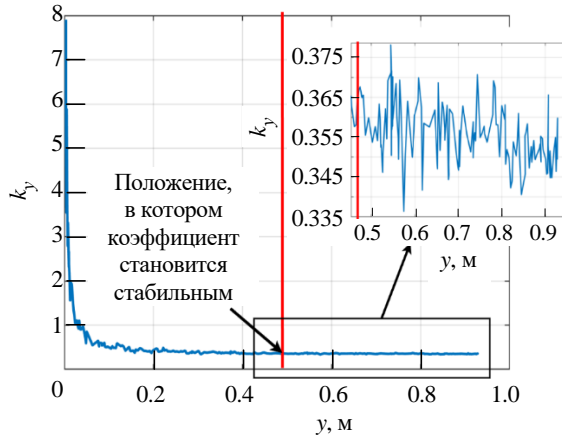


Рис. 8. Зависимость коэффициента масштаба от положений устройства по оси OY

Fig. 8. Dependence of the scale factor on the device positions along the OY axis

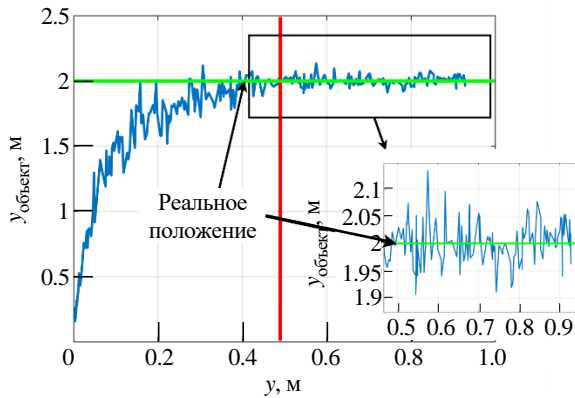


Рис. 9. Оценка положения объекта при движении устройства вдоль оси OY

Fig. 9. Estimation of the object position when the device moves along the OY axis

(бумажной коробки), определенных системой ORB-SLAM с учетом коэффициента масштаба, видно, что по мере увеличения координаты устройства координаты объекта также постепенно приближаются к реальному положению, а при достижении стабильности значения координат находятся вокруг истинного значения. Однако погрешность может достигать более 10 см, что делает их неприемлемыми для навигации в помещении. Кроме того, дисперсия коэффициента масштаба, оцененная в некоторых точках (рис. 10), показывает, что дисперсия также уменьшается со временем и стремится к определенному значению. Это изменение обусловлено тем, что дисперсия координат устройства, определяемых системой ORB-SLAM, также уменьшается со временем.

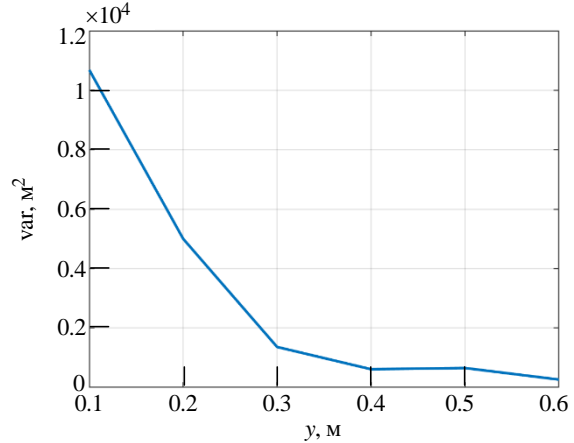


Рис. 10. Дисперсия коэффициента масштаба в разных положениях устройства по оси OY

Fig. 10. Variance of the scale factor at different device positions along the OY axis

Именно поэтому в данной статье предлагается алгоритм, объединяющий два метода: расширенный адаптивный фильтр Калмана с окном "Sage" и метод оценки максимального правдоподобия. Фильтр Калмана используется на этапе, когда коэффициент масштаба изменяется, а метод оценки максимального правдоподобия применяется, когда коэффициент масштаба уже стабилизировался. Схема предложенного алгоритма представлена на рис. 11. Алгоритм разделен на два этапа.

*Первый этап.* На первом этапе, когда коэффициент масштаба изменяется, а также меняется дисперсия, используется расширенный адаптивный фильтр Калмана с окном "Sage" (SWEKF). Схема фильтра показана на рис. 12. Модель состояния и модель наблюдения представлены следующими выражениями:

1) модель состояния:

$$X = \begin{bmatrix} y & v^y & k^y \end{bmatrix};$$

$$X_k = FX_{k-1} + Gu_{k-1} + \omega_{k-1};$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; G = [0 \quad dt \quad 0]^T;$$

$$u = a^y;$$

$$Q = \text{const};$$

2) модель наблюдения:

$$z^{\text{slam}} = k^y y + g^{\text{slam}};$$

$$z^{\text{lh}} = y + g^{\text{lh}};$$

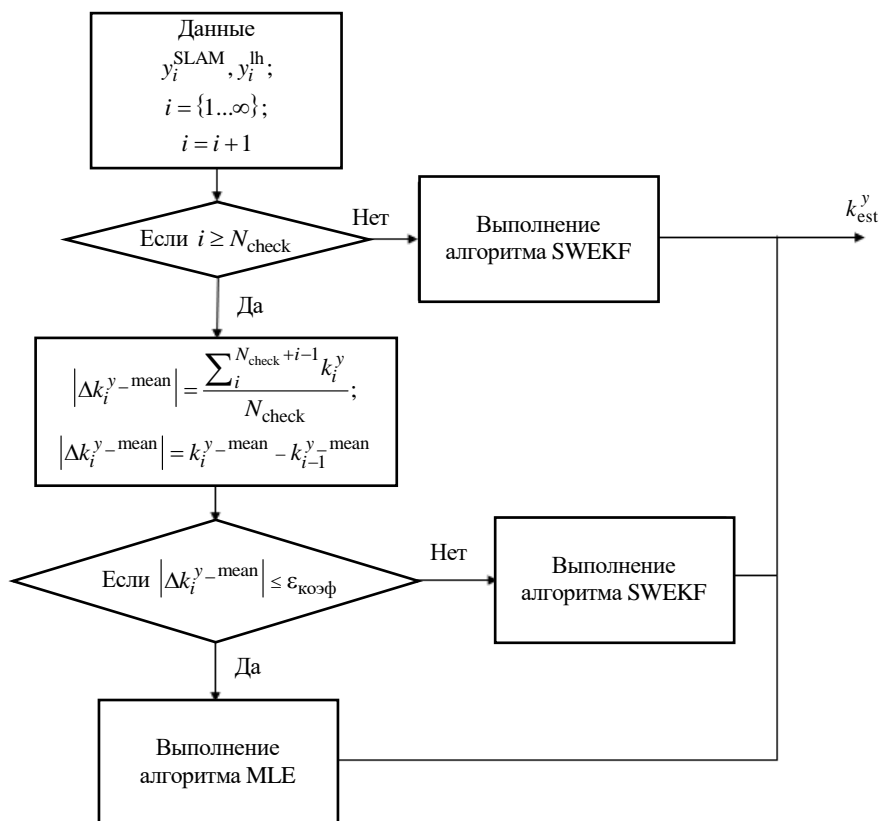


Рис. 11. Схема предложенного алгоритма

Fig. 11. Diagram of the proposed algorithm

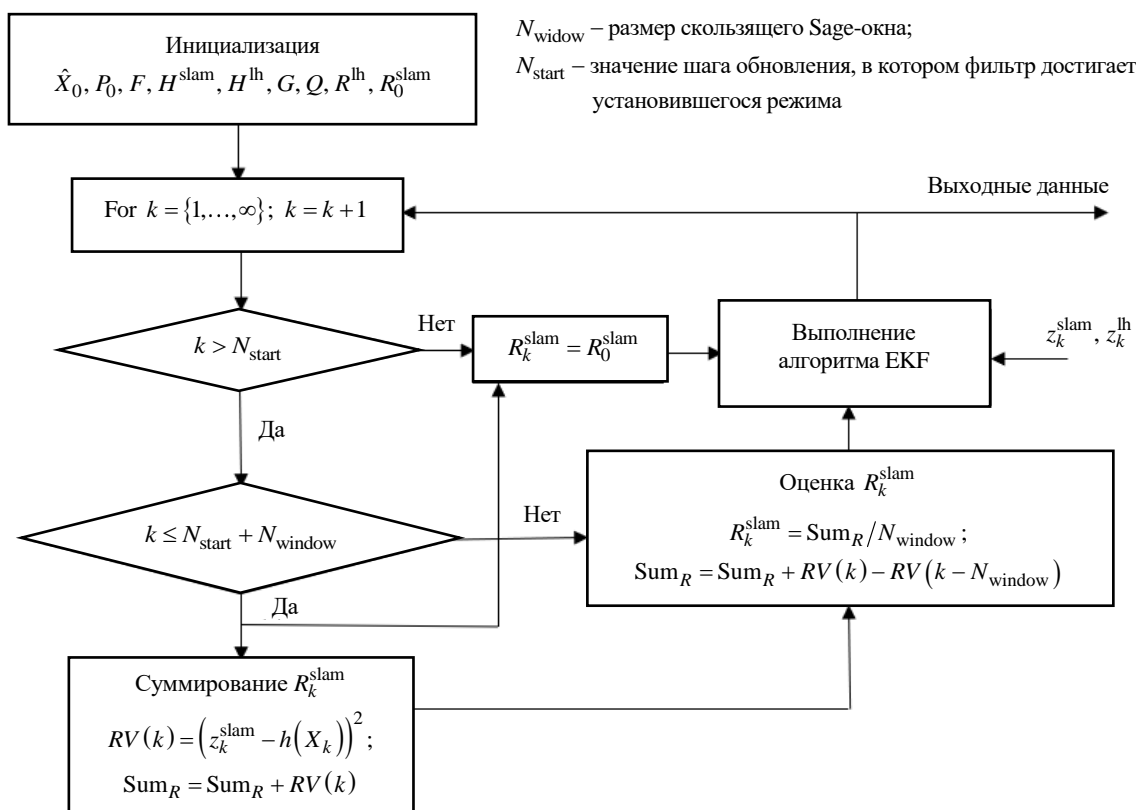


Рис. 12. Схема адаптивного расширенного фильтра Калмана с окном "Sage"

Fig. 12. Diagram of the adaptive Extended Kalman Filter with Sage Window

$$\begin{aligned} H^{\text{slam}} &= \begin{bmatrix} k^y & 0 & y \end{bmatrix}; \\ H^{\text{lh}} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ R^{\text{lh}} &= \text{const}; \\ R^{\text{slam}} &\neq \text{const}, \end{aligned}$$

где  $y, v^y$  – координаты и скорость устройства по  $OY$ ;  $a^y$  – ускорение устройства по  $OY$ , измеряемое акселерометром;  $\omega, \mathfrak{G}^{\text{slam}}, \mathfrak{G}^{\text{lh}}$  – белый гауссовский шум.

Особенность этого адаптивного фильтра заключается в использовании скользящего окна с количеством шагов  $N_{\text{window}}$ , в котором статистические характеристики шума остаются неизменными или изменяются очень мало. Скользящее окно во времени позволяет обновлять дисперсию сигнала системы ORB-SLAM во времени:

$$R_k^{\text{slam}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_{\text{window}}} \left[ z_{k-j}^{\text{slam}} - h(\hat{X}_{k-j}) \right]^2.$$

*Второй этап.* Когда коэффициент масштаба и дисперсия стабилизировались, применяется метод оценки максимального правдоподобия (maximum-likelihood estimation – MLE) – это широко используемый метод для оценки неизвестных параметров статистической модели. Основная идея этого метода заключается в выборе неизвестных параметров так, чтобы вероятность наблюдаемых данных была максимальной. Обычно выполняют минимизацию отрицательного логарифма функции правдоподобия:

$$\begin{aligned} L(y_k, \dots, y_n, k^y) &\propto \\ &\propto \frac{1}{2} \sum_k^n \left( \frac{\|z_k^{\text{slam}} - k^y y_k\|^2}{\sigma_{\text{slam}}^2} + \frac{\|z_k^{\text{lh}} - y_k\|^2}{\sigma_{\text{lh}}^2} \right), \end{aligned}$$

где  $\sigma_{\text{slam}}^2 = R^{\text{slam}}$ ;  $\sigma_{\text{lh}}^2 = R^{\text{lh}}$ .

В этом случае коэффициент масштаба определяется по следующей формуле:

$$k^y = \frac{s_1 - s_2 + \text{sign}(s_3) \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + 4s_3^2}}{2\sigma_{\text{slam}}^{-1} \sigma_{\text{lh}} s_3},$$

$$\begin{aligned} \text{где } s_1 &= \sigma_{\text{lh}}^2 \sum_k^n \left( z_k^{\text{slam}} \right)^2; & s_2 &= \sigma_{\text{slam}}^2 \sum_k^n \left( z_k^{\text{lh}} \right)^2; \\ s_3 &= \sigma_{\text{slam}} \sigma_{\text{lh}} \sum_k^n z_k^{\text{lh}} z_k^{\text{slam}}. \end{aligned}$$

Два этапа связываются между собой одним условием:

$$\left| \Delta k_i^{y-\text{mean}} \right| \leq \varepsilon_{\text{коэф}},$$

где  $\Delta k_i^{y-\text{mean}}$  – изменение среднего значения коэффициента масштаба;  $\varepsilon_{\text{коэф}}$  – константа.

Здесь также используется скользящее окно для определения среднего коэффициента масштаба с целью снижения влияния случайных погрешностей.

**Оценка эффективности предложенного алгоритма.** Для оценки эффективности предложенного алгоритма описанный эксперимент был проведен 3 раза. При каждом проведении коэффициент определялся тремя методами (SWEKF, MLE, SWEKF+MLE). Эффективность оценивалась через определение координат объекта (бумажной коробки). Результаты представлены на рис. 13–15.

Для дополнительной оценки эффективности алгоритма были определены координаты бумажной коробки, установленной в положении 1.1 м. Результаты, показывающие наибольшее значение ошибки определения координат коробок, представлены в таблице.

По результатам трех проведенных экспериментов можно легко видеть эффективность предложенного алгоритма. В то время как метод MLE обладает низкой скоростью сходимости, а фильтр Калмана определяет коэффициент масштаба с недостаточным снижением уровня шума, предложенный алгоритм объединяет преимущества обоих методов. Это позволяет на стадии стабилизации определять коэффициент масштаба с очень низким уровнем шума (1-й эксперимент –  $k^y = 0.361$ ; 2-й эксперимент –  $k^y = 0.264$ ; 3-й эксперимент –  $k^y = 0.307$ ). Точка перехода между двумя этапами находится в диапазоне 0.550...0.650 м (1-й эксперимент –  $u_{\text{переход}} = 0.552$  м; 2-й эксперимент –  $u_{\text{переход}} = 0.621$  м; 3-й эксперимент –  $u_{\text{переход}} = 0.623$  м),

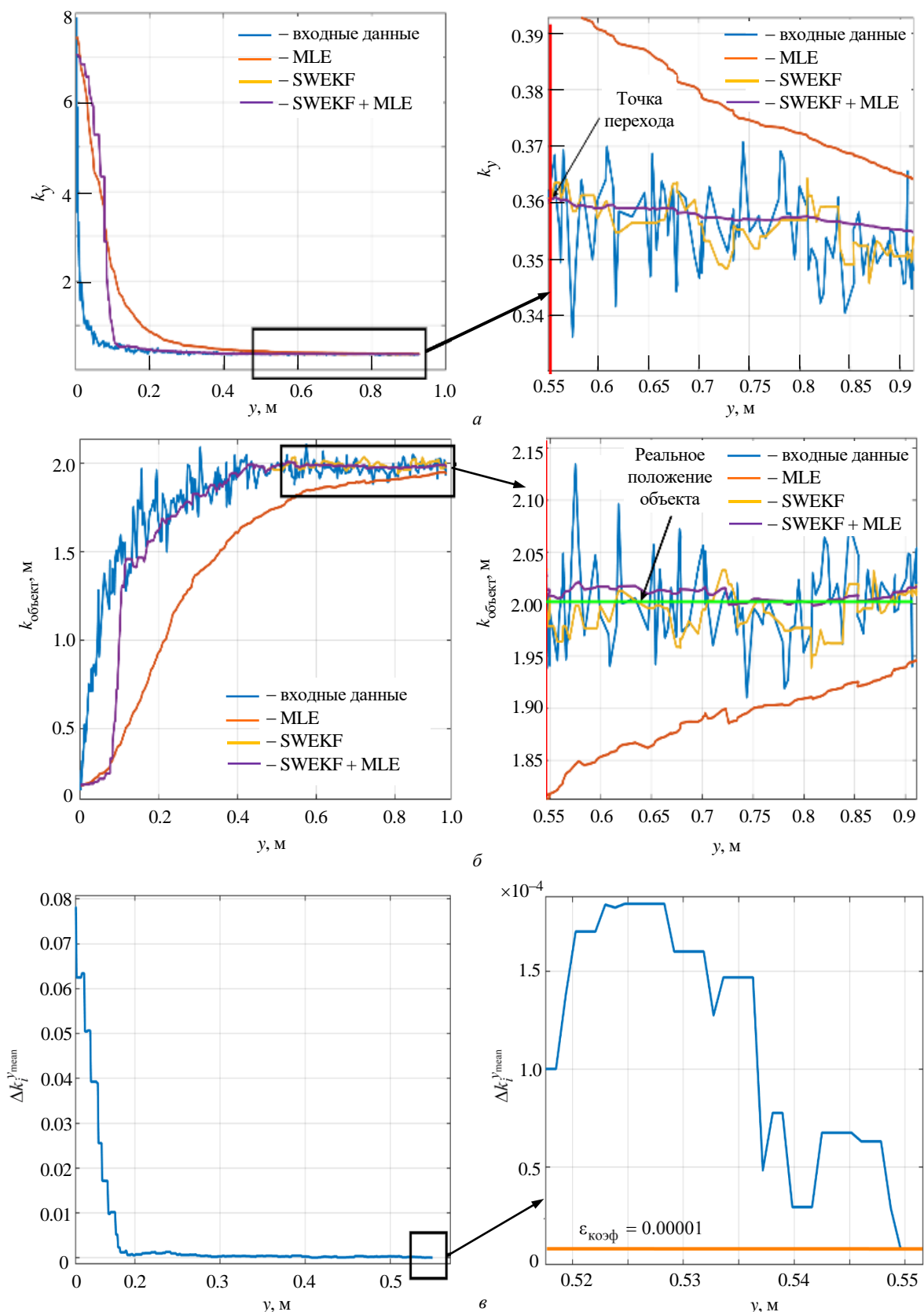


Рис. 13. Результаты первого проведения экспериментов: а – коэффициент масштаба OY; б – координат объекта в положении 2 м по OY; в – изменение среднего коэффициента масштаба

Fig. 13. Results of the first experimental run: а – scale factor OY; б – object coordinates at position 2 m along OY; в – change in the average scale factor

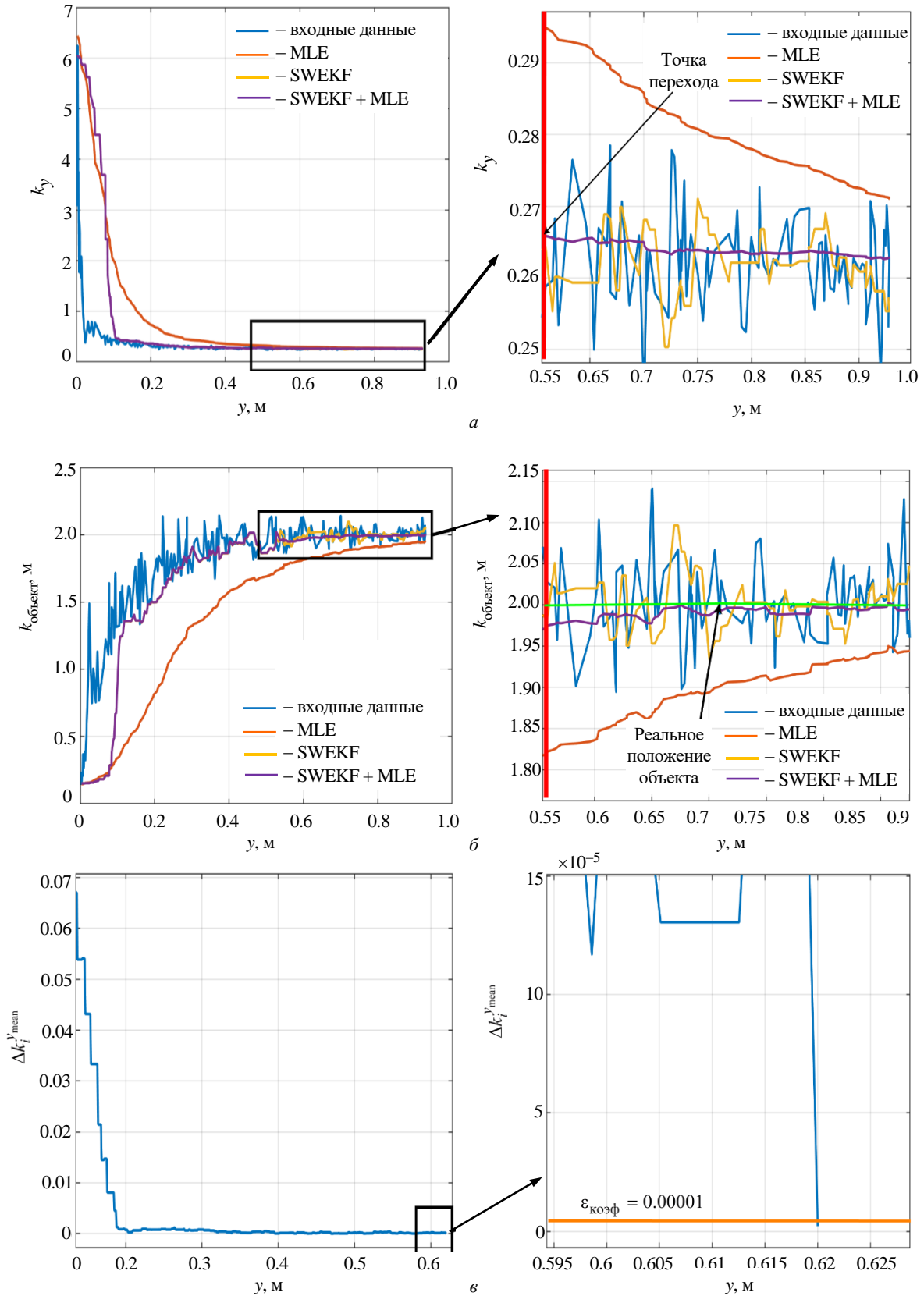


Рис. 14. Результаты второго проведения экспериментов: а – коэффициент масштабирования  $OY$ ; б – координаты объекта в положении 2 м по  $OY$ ; в – изменение среднего коэффициента масштабирования

Fig. 14. Results of the second experimental run: а – scale factor  $OY$ ;

б – object coordinates at position 2 m along  $OY$ ; в – change in the average scale factor

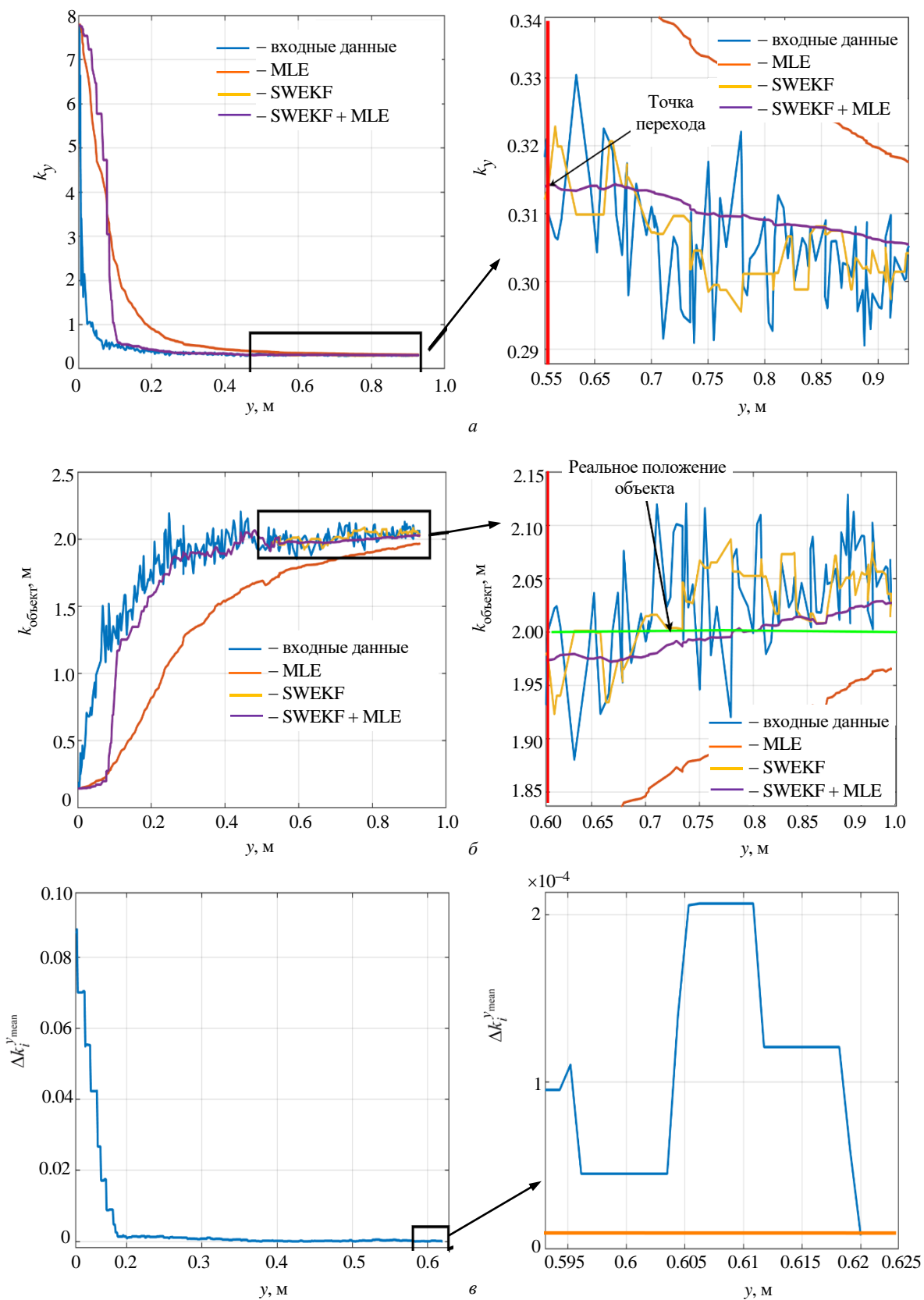


Рис. 15. Результаты третьего проведения экспериментов: а – коэффициент масштаба  $OY$ ; б – координаты объекта в положении 2 м по  $OY$ ; в – изменение среднего коэффициента масштаба

Fig. 15. Results of the third experimental run: а – scale factor  $OY$ ; б – object coordinates at position 2 m along  $OY$ ; в – change in the average scale factor

Максимальные погрешности определения положения  
объекта по оси *OY*

Maximum errors in determining the object position  
along the *OY* axis

Методы	Положение объекта, м	1-й раз, см	2-й раз, см	3-й раз, см
Входные	1.1	8.4	9.6	7.1
	2	13.4	14.1	12.8
MLE	1.1	14.3	13.5	12.6
	2	18.3	17.5	14.7
SWEKF	1.1	5.5	4.6	6.5
	2	6.9	9.7	8.6
SWEKF+MLE	1.1	1.5	1.9	1.6
	2 м	2.1	2.3	2.2

что соответствует оценкам, представленным на рис. 8 и 9.

Эффективность алгоритма также проявляется при определении координат объектов (бумажных коробок). Предложенный алгоритм позволяет определять координаты объектов в пределах 2 м с точностью около 2 см (1-й эксперимент – 2.1 см; 2-й эксперимент – 2.3 см; 3-й эксперимент – 2.2 см), а в пределах 1 м по-

грешность составляет около 1.7 см (1-й эксперимент – 1.5 см; 2-й эксперимент – 1.9 см; 3-й эксперимент – 1.6 см). Таким образом, полученные результаты соответствуют требованиям навигации в помещениях.

**Заключение.** В данной статье предложен алгоритм, объединяющий расширенный адаптивный фильтр Калмана с окном "Sage" и метод оценки максимального правдоподобия для определения коэффициента масштаба карты системы ORB-SLAM в составе системы, интегрированной с инфракрасной системой Valve Lighthouse. Алгоритм демонстрирует высокую эффективность при определении коэффициента масштаба с очень низким уровнем шума, что позволяет определять положение объектов в пределах 2 м с погрешностью около 2.2 см и объектов в пределах 1 м с погрешностью около 1.7 см. Указанные значения погрешностей обеспечивают эффективную работу системы при решении задач навигации и позиционирования в помещениях.

#### Список литературы

1. Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Shanghai, China, 09–13 May 2011. IEEE, 2011. P. 2520–2525. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980409
2. Lindsey Q., Mellinger D., Kumar V. Construction of cubic structures with quadrotor teams // Robotics: Science and Systems VII. Cambridge: MIT Press, 2012. P. 177–184. doi: 10.7551/mitpress/9481.003.0028
3. Cooperative quadcopter ball throwing and catching / R. Ritz, M. Mueller, M. Hehn, R. D'Andrea // Proc. IEEE Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012. P. 4972–4978. doi: 10.1109/IROS.2012.6385963
4. Towards a swarm of agile micro quadrotors / P. Agarwal, S. Kumar, J. Ryde, J. Corso et al. // Robotics: Science and Systems VIII. Cambridge: MIT Press, 2013. P. 217–224. doi: 10.7551/mitpress/9816.001.0001
5. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends // J. of Intelligent & Robotic Systems. 2017. Vol. 87. P. 141–168. doi: 10.1007/s10846-017-0483-z
6. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications // Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems, Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013. P. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752
7. Боронахин А. М., Нгуен К. Х., Нгуен Ч. И. Сравнительное исследование навигационных систем для автономных беспилотных летательных аппаратов в помещении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18
8. DronOS: Aflexible open-source prototyping framework for interactive drone routines / M. Hoppe, M. Burger, A. Schmidt, T. Kosch // Proc. of Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia. 2019. Art. № 15. P. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642
9. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance bounds in positioning with the VIVE lighthouse system // Intern. Conf. on Information Fusion, Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019. P. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242
10. A Review of Multi-Sensor Fusion SLAM Systems Based on 3D LIDAR / X. Xu, L. Zhang, J. Yang, C. Cao, W. Wang, Y. Ran, Z. Tan, M. Luo // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 12. Art. № 2835. doi: 10.3390/rs14122835
11. Lighthouse positioning system: Dataset, accuracy, and precision for UAV research / A. Taffanel, B. Rousselot, J. Danielsson, K. McGuire, K. Richardson, M. Eliasson, T. Antonsson, W. Honig // ArXiv. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (дата обращения: 23.04.2021).
12. Niehorster D. C., Li L., Lappe M. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the

HTC vive virtual reality system for scientific research // I-Perception. 2017. Vol. 8, № 3. Art. № 204166951770820.  
doi: 10.1177/2041669517708205

13. Ikbal M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC vive virtual reality system // IEEE Access. 2020. Vol. 9. P. 3798–3815.  
doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698

14. HTC Vive Tracker: Accuracy for Indoor Localization / J. Lwowski, A. Majumdar, P. Benavidez, J. Prevost, Mo Jamshidi // IEEE Systems, Man and Cybernetics Magazine. 2020. Vol. 6, № 4. P. 15–22.  
doi: 10.1109/MSMC.2020.2969031

15. Grzonka S., Grisetti G., Burgard W. Towards a navigation system for autonomous indoor flying // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 12–17 May 2009. IEEE, 2009. P. 2878–2883.  
doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152446

16. Visual-inertial SLAM for a small helicopter in large outdoor environments / M. W. Achtelik, S. Lynen, S. Weiss, L. Kneip, M. Chli, R. Siegwart // IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012. P. 2651–2652.  
doi: 10.1109/IROS.2012.6386270

17. Vision-based autonomous mapping and exploration using a quadrotor MAV / F. Fraundorfer, L. Heng,

D. Honegger, G. Lee, L. Meier, P. Tanskanen, M. Pollefeys // IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012. P. 4557–4564.  
doi: 10.1109/IROS.2012.6385934

18. Engel J., Sturm J., Cremers D. Scale-aware navigation of a low-cost quadcopter with a monocular camera // Robotics and Autonomous Systems. 2014. Vol 62, № 11. P. 1646–1656.  
doi: 10.1016/j.robot.2014.03.012

19. Versatile distributed pose estimation and sensor self-calibration for an autonomous MAV / S. Weiss, M. Achtelik, M. Chli, R. Siegwart // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Saint Paul, USA, 14–18 May 2012. IEEE, 2012. P. 31–38.  
doi: 10.1109/ICRA.2012.6225002

20. Mur-Artal R., Tardós J. D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras // IEEE Transactions on Robotics. IEEE, 2017. Vol. 33, № 5. P. 1255–1262.  
doi: 10.1109/TRO.2017.2705103

21. Yusefi A., Durdu A., Sungur C. ORB-SLAM-based 2D Reconstruction of Environment for Indoor Autonomous Navigation of UAVs // J. Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi. 2020. P. 466–472.  
doi: 10.31590/ejosat.819620

### Информация об авторах

**Боронахин Александр Михайлович** – доктор технических наук (2013), профессор (2020), профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

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

**Нгуен Куок Хань** – магистр по направлению "Приборостроение" (2020), аспирант Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов – инерциальные системы навигации и ориентации.

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 236, Хоанг Куок Вьет, Ко Нхуэ, Бак Ты Лиэм, Ханой, Вьетнам  
E-mail: nguyenuockhanh183@gmail.com

### References

1. Mellinger D., Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Shanghai, China, 09–13 May 2011. IEEE, 2011, pp. 2520–2525.  
doi: 10.1109/ICRA.2011.5980409

2. Lindsey Q., Mellinger D., Kumar V. Construction of Cubic Structures with Quadrotor Teams. Robotics: Science and Systems VII. Cambridge, MIT Press, 2012, pp. 177–184.  
doi: 10.7551/mitpress/9481.003.0028

3. Ritz R., Mueller M., Hehn M., D'Andrea R. Co-operative Quadcopter Ball Throwing and Catching. Proc. IEEE Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012.

IEEE, 2012, pp. 4972–4978.

doi: 10.1109/IROS.2012.6385963

4. Agarwal P., Kumar S., Ryde J., Corso J. et al. Towards a Swarm of Agile Micro Quadrotors. Robotics: Science and Systems VIII. Cambridge, MIT Press, 2013, pp. 217–224.  
doi: 10.7551/mitpress/9816.001.0001

5. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends. J. of Intelligent & Robotic Systems. 2017, vol. 87, pp. 141–168.  
doi: 10.1007/s10846-017-0483-z

6. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A Survey of Optical Flow Techniques for UAV Navigation Applica-

tions. Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems, Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013, pp. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752

7. Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh, Nguyen Trong Yen. Comparative Review of Navigation Systems for Indoor Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 6–18. (In Russ.) doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18

8. Hoppe M., Burger M., Schmidt A., Kosch T. DronOS: Aflexible Open-Source Prototyping Framework for Interactive Drone Routines. Proc. of Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia. 2019, art. no. 15, pp. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642

9. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance Bounds in Positioning with the VIVE Lighthouse System. Intern. Conf. on Information Fusion, Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019, pp. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242

10. Xu X., Zhang L., Yang J., Cao C., Wang W., Ran Y., Tan Z., Luo M. A Review of Multi-Sensor Fusion SLAM Systems Based on 3D LIDAR. Remote Sensing. 2022, vol. 14, no. 12, art. no. 2835. doi: 10.3390/rs14122835

11. Taffanel A., Rousselot B., Danielsson J., McGuire K., Richardsson K., Eliasson M., Antonsson T., Honig W. Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research. ArXiv. 2021. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (accessed: 23.04.2021).

12. Niehorster D. C., Li L., Lappe M. The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. I-Perception. 2017, vol. 8, no. 3, art. no. 204166951770820. doi: 10.1177/2041669517708205

13. Ikbali M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic Pose Tracking Performance Evaluation of HTC Vive Virtual Reality System. IEEE Access. 2020, vol. 9, pp. 3798–3815. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698

14. Lwowski J., Majumdar A., Benavidez P., Prevost J., Jamshidi M. HTC Vive Tracker: Accuracy

for Indoor Localization. IEEE Systems, Man and Cybernetics Magazine. 2020, vol. 6, no. 4, pp. 15–22. doi: 10.1109/MSMC.2020.2969031

15. Grzonka S., Grisetti G., Burgard W. Towards a Navigation System for Autonomous Indoor Flying. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 12–17 May 2009. IEEE, 2009, pp. 2878–2883. doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152446

16. Achtelik M. W., Lynen S., Weiss S., Kneip L., Chli M., Siegwart R. Visual-Inertial SLAM for a Small Helicopter in Large Outdoor Environments. IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012, pp. 2651–2652. doi: 10.1109/IROS.2012.6386270

17. Fraundorfer F., Heng L., Honegger D., Lee G., Meier L., Tanskanen P., Pollefeys M. Vision-Based Autonomous Mapping and Exploration Using a Quadrotor MAV. IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012, pp. 4557–4564. doi: 10.1109/IROS.2012.6385934

18. Engel J., Sturm J., Cremers D. Scale-Aware Navigation of a Low-Cost Quadcopter with a Monocular Camera. Robotics and Autonomous Systems. 2014, vol. 62, no. 11, pp. 1646–1656. doi: 10.1016/j.robot.2014.03.012

19. Weiss S., Achtelik M., Chli M., Siegwart R. Versatile Distributed Pose Estimation and Sensor Self-Calibration for an Autonomous MAV. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Saint Paul, USA, 14–18 May 2012. IEEE, 2012, pp. 31–38. doi: 10.1109/ICRA.2012.6225002

20. Mur-Artal R., Tardós J. D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. IEEE Transactions on Robotics. IEEE, 2017, vol. 33, no. 5, pp. 1255–1262. doi: 10.1109/TRO.2017.2705103

21. Yusefi A., Durdu A., Sungur C. ORB-SLAM-Based 2D Reconstruction of Environment for Indoor Autonomous Navigation of UAVs. J. Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi. 2020, pp. 466–472. doi: 10.31590/ejosat.819620

### Information about the authors

**Alexander M. Boronakhin**, Dr Sci. (Eng.) (2013), Professor (2020), Professor of the Department of Laser Measuring and Navigation Systems, Dean of the Faculty of Information Measuring and Biotechnical Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of railway traffic. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: AMBoronahin@etu.ru

**Nguyen Quoc Khanh**, Engineer in Instrumentation Engineering (2020), Postgraduate student at Le Quy Don State Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 11 scientific publications. Area of expertise: inertial navigation and orientation systems. Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet, Co Nhue, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam E-mail: nguyenquockhanh183@gmail.com

## Разработка магнитной линзы микрофокусной рентгеновской трубки без принудительного жидкостного охлаждения

М. В. Блудов<sup>✉</sup>, А. А. Трубицын

Рязанский государственный радиотехнический университет  
им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

<sup>✉</sup> [bludovmaksim@rambler.ru](mailto:bludovmaksim@rambler.ru)

### Аннотация

**Введение.** Микрофокусная рентгеновская трубка является важной составляющей современной медицинской диагностики, научных исследований и промышленных применений. Одним из ее основных элементов служит система фокусировки, частью которой является магнитная линза. Ее характеристики во многом определяют разрешающую способность устройства. На эффективность и надежность работы фокусирующей системы важное влияние оказывает правильный учет тепловых режимов. Проблема теплового расчета приобретает особую значимость ввиду интенсивного роста требований к качеству рентгеновских изображений. Для охлаждения электронных линз системы фокусировки рентгеновской трубки в основном используют принудительное жидкостное охлаждение, что создает дополнительные трудности и затраты при производстве и эксплуатации прибора.

**Цель работы.** Построение численной модели тепловых процессов в магнитной линзе, а также определение ее оптимальных параметров для возможности работы без принудительного жидкостного охлаждения и обеспечения микронного диаметра фокусного пятна.

**Материалы и методы.** Для построения модели тепловых процессов в магнитной линзе применялись численно-аналитические методы. Оценка полученных результатов выполнялась численным моделированием тепловых процессов, реализованным в среде Comsol Multiphysics.

**Результаты.** Значения температуры катушки магнитной линзы, полученные в рамках расчетной модели и в результате моделирования, не превышают предельно допустимых значений. Графики распределения температуры по сечению катушки в рамках расчетной модели и в модели Comsol Multiphysics имеют одинаковую форму, что подтверждает справедливость расчетов.

**Заключение.** Полученные оптимальные параметры магнитной линзы обеспечивают ее стабильную работу при естественном охлаждении.

**Ключевые слова:** рентгеновская трубка, магнитная линза, соленоид, тепловые процессы, жидкостное охлаждение

**Для цитирования:** Блудов М. В., Трубицын А. А. Разработка магнитной линзы микрофокусной рентгеновской трубки без принудительного жидкостного охлаждения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 79–90.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-79-90

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

**Источник финансирования.** Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2024-0001).

Статья поступила в редакцию 16.09.2025; принята к публикации после рецензирования 27.10.2025; опубликована онлайн 30.04.2026



## Development of a Magnetic Lens for a Microfocus X-Ray Tube without Forced Liquid Cooling

Maksim V. Bludov<sup>✉</sup>, Andrey A. Trubitsyn

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

<sup>✉</sup> bludovmaksim@rambler.ru

### Abstract

**Introduction.** The microfocus X-ray tube is a key component in modern medical diagnostic, scientific research, and industrial applications. One of its main elements is the focusing system, with the magnetic lens at its core. The characteristics of this lens largely determine the spatial resolution of the device. Accurate consideration of thermal conditions is essential for ensuring the efficiency and reliability of the focusing system. The importance of thermal analysis has increased significantly due to the tightening requirements imposed on the quality of X-ray images. Today, the electronic lenses of the X-ray tube focusing system are cooled mainly by forced liquid cooling. However, this approach creates additional technological and economic difficulties during the manufacture and operation of the device.

**Aim.** Construction of a numerical model of thermal processes in a magnetic lens, as well as determination of its optimal parameters for operation without forced liquid cooling and ensuring a micron diameter of the focal spot.

**Materials and methods.** Numerical and analytical methods were used to construct a model of thermal processes in a magnetic lens. The results obtained were evaluated using numerical modeling of thermal processes implemented in the Comsol Multiphysics environment.

**Results.** The temperature values of the magnetic lens coil obtained within the calculation model and as a result of simulation did not exceed the maximum permissible values. The temperature distribution graphs across the coil cross section obtained by the calculation and Comsol Multiphysics models showed good agreement, which confirms the validity of the calculations.

**Conclusion.** The obtained optimal parameters of the magnetic lens ensure its stable operation under natural cooling.

**Keywords:** X-ray tube, magnetic lens, solenoid, thermal processes, liquid cooling

**For citation:** Bludov M. V., Trubitsyn A. A. Development of a Magnetic Lens for a Microfocus X-Ray Tube without Forced Liquid Cooling. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 79–90. doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-79-90

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

**Source of funding.** The work was performed as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSN-2024-0001).

Submitted 16.09.2025; accepted 27.10.2025; published online 30.04.2026

**Введение.** Микрофокусная рентгеновская трубка является важным элементом современной медицинской диагностики, научных исследований и промышленных применений. Она обладает рядом преимуществ по сравнению со стандартной макрофокусной установкой: компактностью оборудования, пониженной радиационной нагрузкой на изучаемый объект и обслуживающий персонал, возможностью локальных исследований и получения увеличенных изображений, повышенной информативностью и качеством снимков [1, 2].

Одним из основных элементов рентгеновской трубки является система фокусировки, позволяющая преобразовать широкий поток электронов с катода в тонкий электронный луч с необходимыми параметрами. Ее характеристики во многом определяют разрешающую способность устройства и достижение высококачественной работы рентгеновской трубки.

Формирование фокусного пятна в современных трубках обеспечивается последовательно размещенными электрической и магнитной фокусирующими системами. Электростатическая

катодная линза, в технических приложениях называемая катодно-модуляторным узлом, служит для ускорения электронов и создания промежуточного фокуса. При построении магнитных фокусирующих систем используют либо одну объектную линзу, либо последовательность конденсорной и объектной линз. Также перспективным является использование комбинации из постоянных магнитов и электромагнитов [3].

Эффективность и надежность работы магнитной фокусирующей системы зависит от множества факторов, среди которых важное значение имеет правильный учет тепловых режимов. Проблема теплового расчета приобретает особую значимость ввиду интенсивного роста требований к качеству рентгеновских изображений. В частности, достижение диаметра фокального пятна порядка 1 мкм требует соответствующего снижения фокусного расстояния и значительного роста магнитной силы (количества ампер-витков) магнитной линзы (МЛ), что приводит к увеличению тепловыделения и вызывает перегрев отдельных участков прибора. Для охлаждения электронных линз системы фокусировки в основном используют принудительное жидкостное охлаждение, что создает дополнительные трудности и затраты при производстве и эксплуатации прибора.

В современных работах, посвященных магнитным линзам рентгеновских трубок, практически не затрагиваются задачи тепловыделения. Они сосредоточены в основном на улучшении их оптических характеристик путем минимизации уровня аберраций или оптимизации конструктива, в частности полюсных наконечников [4–7].

В данной статье рассматривается и моделируется объективная магнитная линза микрофокусной рентгеновской трубки с прострельным анодом. Цель исследования – построение численной модели тепловых процессов в линзе, а также определение ее параметров для получения МЛ, способной работать без принудительного жидкостного охлаждения и обеспечивать микронный диаметр фокусного пятна.

**Построение численной модели тепловых процессов в магнитной линзе.** Магнитные линзы представляют собой аксиально-симметричный электромагнит либо постоянный магнит. В качестве МЛ чаще используют катушки с током (соленоиды) (рис. 1), чем постоянные магниты, поскольку в этом случае проще регулировать фокусное расстояние за счет изменения тока катушки и, как следствие, изменения магнитного поля.

**Постановка задачи.** Для оценки эффективности рассеивания тепловой мощности необходимо определить критерии, по которым можно делать выводы о работоспособности прибора при установившемся тепловом режиме. Очевидно, что главным критерием является температура в объеме твердого тела, которая не должна превышать некоторого критического значения. Такое значение может быть связано с допустимой температурой материала, а именно температурой плавления и кипения. Превышение допустимой температуры вызывает необратимые изменения в структуре твердого тела, что может привести к выходу прибора из строя.

Источником нагрева МЛ служит достаточно большой ток, питающий обмотки соленоида и

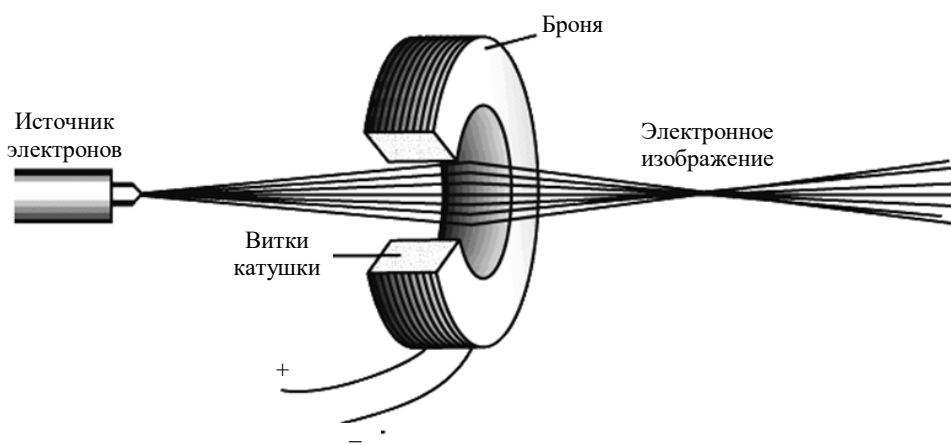


Рис. 1. Схематическое изображение магнитной линзы на основе электромагнита

Fig. 1. Schematic representation of a magnetic lens based on an electromagnet

выделяющий тепловую мощность. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо определить максимальную тепловую мощность, которую способна выдержать МЛ без принудительного жидкостного охлаждения.

МЛ можно представить в виде катушки с током. Тепловые процессы, происходящие в ее обмотках при протекании электрического тока, имеют ряд особенностей.

Нагрев и охлаждение обмоток в значительной степени зависит от времени протекания в них электромагнитных процессов. Тепловые параметры обмотки, такие как удельная теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, температурный коэффициент сопротивления материала обмотки, зависят от температуры.

Отдача тепла в окружающую среду с поверхности обмотки также зависит от ряда факторов: геометрии, размеров и исполнения обмотки, ее температуры, условий охлаждения, теплового контакта с магнитопроводом.

Такое многообразие тепловых явлений в обмотках МЛ усложняет расчет теплового режима соленоида.

Исходные данные для построения численной модели тепловых процессов в МЛ отображены в табл. 1.

Полный расчет тепловых процессов в МЛ является довольно громоздким, поэтому далее будут приведены его наиболее важные результаты.

На первом шаге расчетов получены размеры катушки и ее обмоточные данные. Так, по известным выражениям определены размеры обмотки и допустимая температура нагрева катушки: толщина обмотки  $h_0 = 0.018$  м; длина обмотки  $l_0 = 0.073$  м; допустимая температура нагрева катушки  $t_{\text{доп}} = 62^\circ\text{C}$ .

На основании закона Ома получено сечение провода обмотки:

$$S_{\text{пр}} = \frac{\rho_{\text{наг}} l_{\text{ср}} IN}{U_{\text{min}}} = 6.788 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2,$$

где  $\rho_{\text{наг}}$  – удельное сопротивление катушки в нагретом состоянии;  $l_{\text{ср}}$  – средняя длина витка обмотки;  $I$  – ток обмотки в первом приближении;  $N$  – число витков в первом приближении;  $U_{\text{min}}$  – минимальное напряжение обмотки.

Табл. 1. Исходные данные

Tab 1. Initial data

Параметр	Значение
Допустимая температура нагрева катушки	$t_{\text{доп}} = 85^\circ\text{C}$
Температура окружающей среды	$t_{\text{окр}} = 23^\circ\text{C}$
Число ампер-витков в первом приближении	$I \cdot N = 2500 \text{ А} \cdot \text{В}$
Напряжение обмотки	$U = 12 \text{ В}$
Внутренний диаметр катушки, определенный в [8]	$d_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Диаметр обмоточного провода ПЭТ-155 с изоляцией и без нее в первом приближении	$d_{\text{и}} = 1.041 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $d = 0.95 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Расчеты позволили уточнить диаметр провода ПЭТ-155 и выбрать его ближайшее значение из стандартного ряда [9], который с учетом округления получился равным:  $d = 0.95 \cdot 10^{-3}$  м, с учетом изоляции  $d_{\text{и}} = 1.041 \cdot 10^{-3}$  м.

Для обеспечения высокой плотности намотки при минимальных размерах, а также для улучшения теплоотвода за счет большей площади контакта смежных витков выбрана шахматная укладка провода.

С учетом способа укладки определен коэффициент запаса  $K_{\text{зап}} = 1.376$  и получено окончательное число витков в обмотке:

$$N' = \frac{4Q_0 K_{\text{зап}}}{\pi d^2} = 2.587 \cdot 10^3 \text{ витков},$$

где  $Q_0 = 1.332 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  – площадь окна намотки.

**Определение ориентировочной температуры по формуле Ньютона.** Далее представляется упрощенная методика теплового расчета, при которой учитывается суммарный эффект от трех видов теплоотдачи. Для установившегося теплового режима формула Ньютона будет выглядеть следующим образом:

$$dQ = K'_T S (t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}) dt,$$

где  $dQ$  – количество теплоты, отдаваемое за время  $dt$ ;  $K'_T$  – коэффициент теплоотдачи;  $S$  – площадь полной поверхности охлаждения тела;  $t_{\text{доп}}$  – допустимая температура нагрева катушки;  $t_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды.

Тепловой поток в таком случае определяется как

$$\Phi_T = \frac{dQ}{dt} = K'_T S (t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}});$$

$$\Phi_T = P = I'^2 R_{\text{наг}},$$

где  $P$  – потребляемая мощность;  $I'$  – ток обмотки;  $R_{\text{наг}}$  – сопротивление нагретой обмотки. Потребляемая мощность катушки составила 9.86 Вт.

Стоит отметить, что мощность, подводимая электронным пучком к мишени прострельного типа, составляет не более 1 Вт на 1 мкм<sup>2</sup> площади поперечного сечения электронного пучка [10, 11]. Это соотношение также подтверждается техническими характеристиками микрофокусных рентгеновских трубок с прострельным анодом компаний Hamamatsu и X-RAY WorX [12, 13]. Дальнейшее увеличение плотности мощности приводит к разрушению материала анода. Причем часть тепловой мощности рассеивается из фокального пятна в воздух за счет конвекции. Также на практике между катушкой и цилиндрическим анодом обычно размещаются втулки, исключаяющие прямую передачу тепла за счет теплопроводности от анода к МЛ. Поэтому можно считать, что для рентгеновской трубки с микронным диаметром фокусного пятна на нагрев анода идет менее 1 Вт тепловой мощности, что более чем на порядок меньше мощности катушки. Таким образом, для рассматриваемой задачи нагревом пролетной трубы и ее влиянием на суммарное выделяемое количество теплоты в дальнейших расчетах можно пренебречь.

Уравнение Ньютона в этих условиях принимает вид

$$P = K'_T S (t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}).$$

Поскольку длина катушки в 4 раза больше высоты окна намотки, то допустимо считать катушку длинной. Тогда теплоотдачей с торцов катушки можно пренебречь. Также считаем, что катушка плотно прилегает к магнитопроводу, поэтому учитываем внутреннюю поверхность охлаждения [14].

После определения площади наружной, внутренней и полной поверхностей охлаждения получены коэффициент теплоотдачи для

предельно допустимой температуры катушки и температура нагрева обмотки [15]:

$$K'_T = \frac{3.6 \left[ 1 + 0.005 (t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}) \right]}{\sqrt[5]{S}} =$$

$$= 10.402 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

$$\tau' = \frac{P}{K'_T (S_H + \alpha_S S_B) n_P} = 49.483 \text{ °C},$$

где  $S_H, S_B$  – площади наружной и внутренней поверхностей охлаждения;  $\alpha_S = 1.7$  – коэффициент, учитывающий теплоотдачу с внутренней поверхности катушки;  $n_P$  – коэффициент перегрузки по мощности.

Таким образом, температура нагрева катушки составила:

$$t_{\text{наг}} = \tau' + t_{\text{окр}} = 72.483 \text{ °C}.$$

Полученная температура нагрева не превышает максимально допустимую температуру 72.483 °C < 85 °C.

**Расчет по тепловой схеме замещения.** На следующей стадии анализа проводится более подробный и точный расчет с учетом различных видов теплоотдачи. Полная и эквивалентная схемы, заменяющие тепловую систему МЛ на электрическую цепь с источниками тепла, эквивалентными тепловым потерям, и тепловыми сопротивлениями, приведены на рис. 2, где обозначены:  $R_{T,H}$ ,  $R_{T,B}$  – тепловые сопротивления наружных и внутренних слоев обмотки;  $R_{T,И1}$ ,  $R_{T,И2}$  – тепловые сопротивления слоев изоляции;  $R_{T,кар}$  – тепловое сопротивление каркаса;  $R_{T,В.П}$  – тепловое сопротивление воздушной прослойки;  $R_{T,о.н}$ ,  $R_{T,о.м}$  – тепловое сопротивление теплоотдачи в окружающую среду от наружной поверхности катушки и магнитопровода;  $t_B$ ,  $t_H$  – температура внутренней и наружной поверхности обмотки;  $t_{И1}$  – температура наружных слоев внутренней изоляции обмотки;  $t_{И2}$  – температура наружной поверхности обмотки наружной изоляции;  $t_{кар}$  – температура на наружной стенке каркаса;  $t_{\text{max}}$  – максимальная температура нагрева;  $t_M$  – темпера-

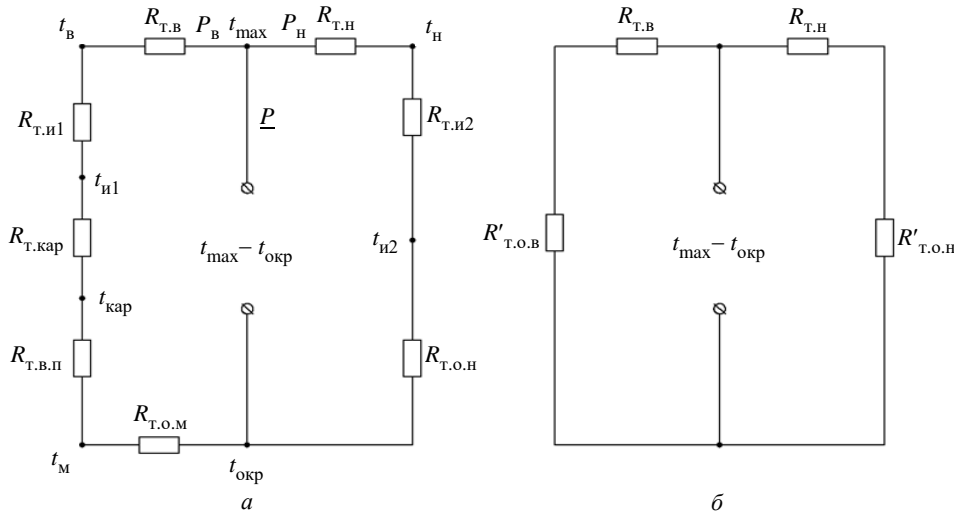


Рис. 2. Тепловая схема замещения катушки с магнитопроводом: а – полная; б – эквивалентная  
 Fig. 2. Thermal scheme for replacing the coil with a magnetic circuit: а – complete; б – equivalent

тура нагрева магнитопровода;  $t_{окр}$  – температура окружающей среды;  $R'_{T.о.в}$ ,  $R'_{T.о.н}$  – эквивалентные тепловые сопротивления в окружающую среду с внешней и наружной поверхностей обмотки.

Коэффициенты теплопередачи с наружной поверхности катушки и магнитопровода с учетом конвекции и излучения. На рис. 3 представлен эскиз катушки с магнитопроводом. На основе полученных результатов расчета задана геометрия МЛ: толщина каркаса  $\Delta_{кар} = w = 5 \cdot 10^{-3}$  м; диаметр цилиндрической обмотки  $d_o = 0.02$  м; длина обмотки катушки  $l_o = 0.073$  м; толщина обмотки катушки  $h_o = 0.018$  м; диаметр сердечника  $d_c = d_o - 2\Delta_{кар} = 0.01$  м; толщина магнитопровода  $a = w = 5 \cdot 10^{-3}$  м; ширина магнитопровода  $b = d_c + 2(\Delta_{кар} + a + h_o) = 0.067$  м; длина магнитопровода  $L = l_o + 2a = 0.083$  м.

Для определения коэффициента теплоотдачи излучением с наружной поверхности ( $K_{T.и.н}$ ) использовались два закона теплопередачи:

1) закон Ньютона–Рихмана для конвективного теплового потока:

$$Q_K = K_{T.и.н} S_{н.п} (t_{наг} - t_{окр}),$$

где  $Q_K$  – количество теплоты, передаваемой конвекцией;  $S_{н.п}$  – площадь наружной поверхности;

2) закон Стефана–Больцмана для случая,

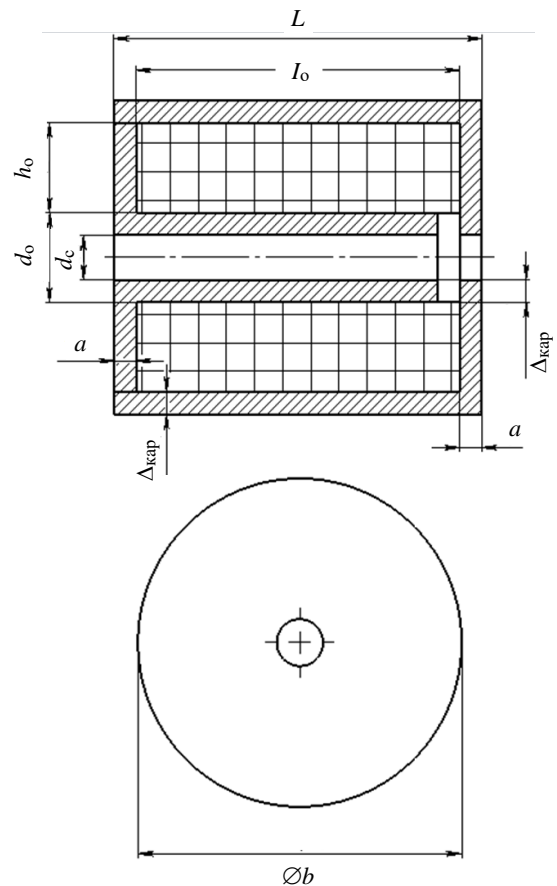


Рис. 3. Эскиз катушки с магнитопроводом  
 Fig. 3. Sketch of a coil with a magnetic circuit

когда тело находится на достаточном удалении от других тел:

$$Q_{и} = 5.67 S_{н.п} \varepsilon \left[ \left( \frac{273 + t_{наг}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + t_{окр}}{100} \right)^4 \right],$$

где  $Q_{\text{и}}$  – количество теплоты, передаваемой излучением;  $\varepsilon$  – степень черноты.

Поскольку теплота от катушки передается в окружающую среду конвекцией и затем излучением, то

$$Q = Q_{\text{к}} = Q_{\text{и}}.$$

Тогда коэффициент теплоотдачи излучением с наружной поверхности катушки [16]:

$$K_{\text{т.и.н}} = \frac{5.67\varepsilon_{\text{к}} \left[ \left( \frac{273 + t_{\text{наг}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + t_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{наг}} - t_{\text{окр}}} = 7.189 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

где  $\varepsilon_{\text{к}} = 0.955$  – степень черноты провода катушки.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией с наружной поверхности катушки определен через критерий Нуссельта [17]:

$$K_{\text{т.к.н}} = \frac{\text{Nu}_{\text{ср}} \lambda_{\text{ср}}}{L} = 6.821 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

где  $\text{Nu}_{\text{ср}}$  – критерий Нуссельта;  $\lambda_{\text{ср}} = 2.83 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха, взятый для температуры перегрева.

В результате получен коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности катушки

$$K_{\text{т.н}} = K_{\text{т.к.н}} + K_{\text{т.и.н}} = 14.01 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}.$$

Аналогичный подход использован для получения коэффициента теплоотдачи с наружной поверхности магнитопровода:

$$K_{\text{т.м}} = K_{\text{т.к.м}} + K_{\text{т.и.м}} = 7.492 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

где  $K_{\text{т.к.м}}$  – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности магнитопровода конвекцией;  $K_{\text{т.и.м}}$  – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности магнитопровода излучением.

Эквивалентный коэффициент теплоотдачи с наружной и внутренней поверхностей обмотки. Расчет проводился согласно схеме, приведенной на рис. 4. Определены эквивалентные

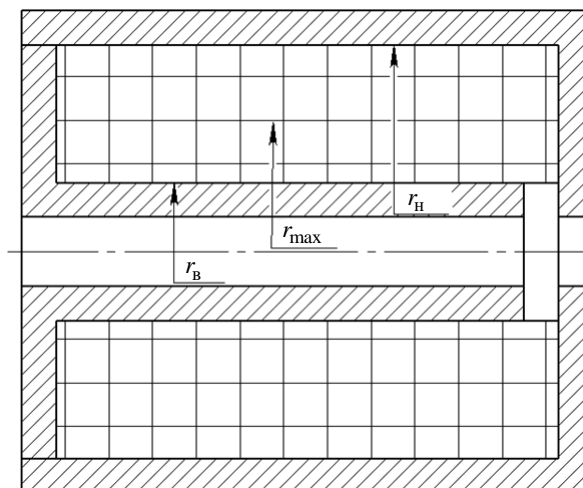


Рис. 4. Эскиз катушки с внутренними радиусами:  $r_n$  – наружный радиус;  $r_{\text{max}}$  – радиус слоя с максимальной температурой;  $r_b$  – внутренний радиус

Fig. 4. Sketch of a coil with inner radii:  $r_n$  – outer radius;  $r_{\text{max}}$  – radius of the layer with maximum temperature;  $r_b$  – inner radius

коэффициенты теплоотдачи с наружной и внутренней поверхностями обмотки [18–20]:

$$K'_{\text{т.н}} = \frac{1}{1/K_{\text{т.н}}} = 14.01 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}};$$

$$K'_{\text{т.в}} = \frac{1}{S_{\text{в}} (R_{\text{т.кар}} + R_{\text{т.о.м}})} = 35.484 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}.$$

Для нахождения радиуса наиболее нагретого слоя и максимальной температуры внутренней и наружной поверхностей катушки получен коэффициент теплопроводности замещающего тела для рядовой намотки катушки:

$$\lambda_3 = 1.45 \sqrt{\lambda_{\text{и}} \lambda_{\text{в}} \left( \frac{d}{\delta_{\text{и}}} + 1 \right)} - 1.57 \lambda_{\text{в}} = 0.466 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}},$$

где  $\lambda_{\text{и}}$  – коэффициент теплопроводности изоляции обмоточного провода;  $\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $\delta_{\text{и}}$  – толщина изоляции обмоточного провода.

Радиус слоя с максимальной температурой определен следующим выражением:

$$r_{\text{max}} = \sqrt{\frac{0.5(r_n^2 - r_b^2) + \frac{\lambda_3 r_n}{K'_{\text{т.н}}} + \frac{\lambda_3 r_b}{K'_{\text{т.в}}}}{\ln \frac{r_n}{r_b} + \frac{\lambda_3}{K'_{\text{т.н}} r_n} + \frac{\lambda_3}{K'_{\text{т.в}} r_b}}} = 0.02 \text{ м},$$

где  $r_H$  – наружный радиус;  $r_B$  – внутренний радиус.

Определение максимальной температуры нагрева катушки. В соответствии со схемой замещения (см. рис. 2):

$$t_{\max} = P_H (R_{T.H} + R'_{T.O.H}) + t_{\text{окр}} = 59.766 \text{ }^\circ\text{C},$$

где  $P_H$  – мощность, рассеиваемая через наружную поверхность.

Определена температура внутренней поверхности катушки [21]:

$$t_B = t_{\max} - \frac{qP}{2\lambda_3} \left( \frac{r_B^2 - r_{\max}^2}{2} - r_{\max}^2 \ln \frac{r_B}{r_{\max}} \right) = 51.885 \text{ }^\circ\text{C},$$

где  $qP$  – удельная объемная мощность катушки.

Получена температура наружной поверхности катушки:

$$t_H = t_{\max} - \frac{qP}{2\lambda_3} \left( \frac{r_H^2 - r_{\max}^2}{2} - r_{\max}^2 \ln \frac{r_H}{r_{\max}} \right) = 55.469 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Определено выражение для распределения температуры по сечению обмотки в радиальном направлении:

$$t(r) = t_{\max} - \frac{qP}{2\lambda_3} \left( \frac{r^2 - r_{\max}^2}{2} - r_{\max}^2 \ln \frac{r}{r_{\max}} \right).$$

На рис. 5 представлен график зависимости температуры от радиуса катушки. Из рисунка видно, что максимум температуры находится на некотором удалении от внутренней полости катушки.

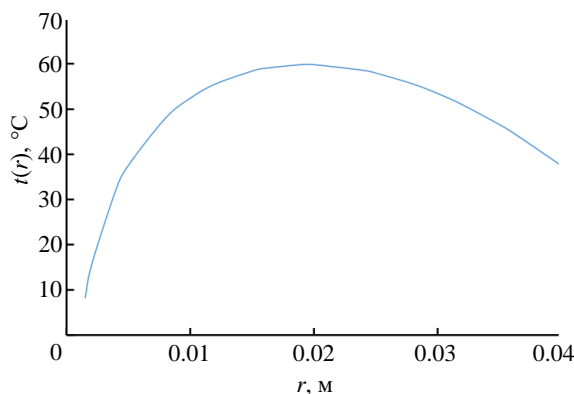


Рис. 5. Распределение температуры по сечению катушки  
 Fig. 5. Temperature distribution across the coil cross section

Максимальное значение температуры  $t(r)_{\max} = 59.766 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается в точке  $r = 0.02 \text{ м}$ .

Расчет значений температур на поверхностях различных элементов катушки. Мощность, рассеиваемая через внутреннюю поверхность катушки:

$$P_B = P - P_H = 4.072 \text{ Вт}.$$

Температура наружной стенки каркаса

$$t_{\text{кар}} = P_B R_{T.O.M} + t_{\text{окр}} = 54.964 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температуры внутренней поверхности

$$t_{H1} = t_{\text{кар}} + P_B R_{T.кар} = 79.574 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура наружной поверхности (данная температура была определена ранее)

$$t_H = 55.469 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура обмотки

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_B + t_{\max} + t_H}{3} = 55.707 \text{ }^\circ\text{C}.$$

**Тепловой расчет магнитной линзы в среде Comsol Multiphysics.** Для оценки полученных результатов проводилось моделирование тепловых процессов МЛ с учетом влияния внешнего и внутреннего каркаса в среде Comsol Multiphysics. Размеры и характеристики линзы (рис. 6) определены на основе данных, полученных при расчете в соответствии с вышеизложенной методикой.

Выполнено два тепловых исследования:

1. Исследование с использованием мультифизики (Electromagnetic Heating). Источником тепла выступал ток, питающий обмотки соленоида. В качестве исходных данных использованы магнитные свойства МЛ (Magnetic Fields) и условия теплопередачи в твердых телах (Heat Transfer in Solids) с охлаждением тела в результате естественной конвекции. Результаты моделирования отображены на рис. 7, а график распределения температуры по сечению катушки – на рис. 8.

2. Исследование с использованием теплопередачи в твердых телах (Heat Transfer in

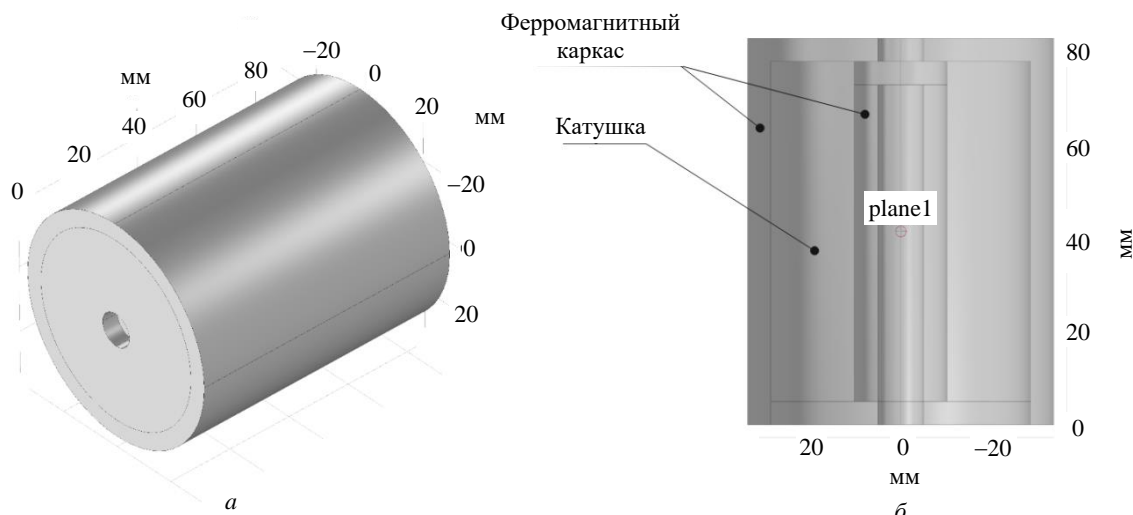


Рис. 6. Расчетная модель магнитной линзы в Comsol Multiphysics: *a* – изометрия; *б* – сечение линзы  
 Fig. 6. Calculation model for a magnetic lens in Comsol Multiphysics: *a* – isometry; *б* – lens cross section

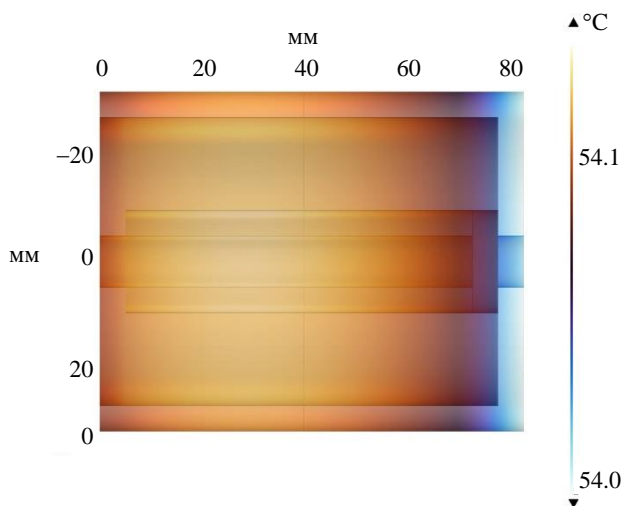


Рис. 7. Распределение температуры в МЛ при задании мультифизики

Fig. 7. Temperature distribution in a magnetic lens when specifying multiphysics

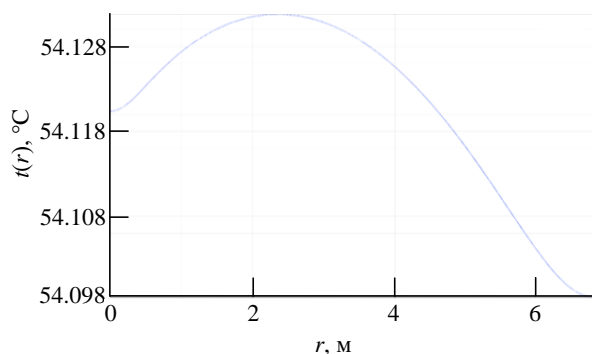


Рис. 8. Распределение температуры по сечению катушки при задании мультифизики

Fig. 8. Temperature distribution across the coil cross-section when specifying multiphysics

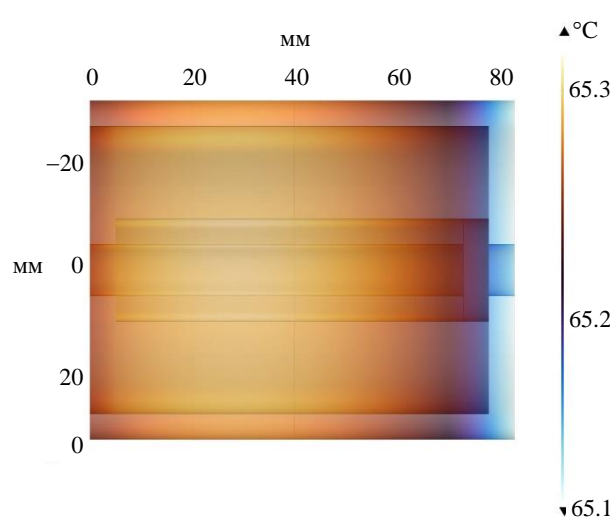


Рис. 9. Распределение температуры в МЛ при задании источника тепла

Fig. 9. Temperature distribution in a magnetic lens when specifying a heat source

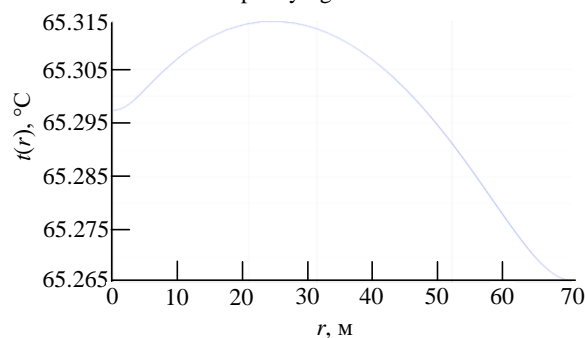


Рис. 10. Распределение температуры по сечению катушки при задании источника тепла

Fig. 10. Temperature distribution across the coil cross-section when specifying a heat source

Solids). Здесь вручную задавался источник тепла в виде значения тепловой мощности, рас-

считанной ранее. В качестве исходных данных также использовались магнитные свойства МЛ

(Magnetic Fields) и условия теплопередачи в твердых телах (Heat Transfer in Solids) с охлаждением тела в результате естественной конвекции. Результаты моделирования отображены на рис. 9, а график распределения температуры по сечению катушки – на рис. 10.

**Заключение.** Для оценки результатов, полученных в рамках расчетной модели, а также моделированием в Comsol Multiphysics, представлены соответствующие данные в табл. 2.

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Значения температуры, полученные в рамках расчетной модели и в результате моделирования в среде Comsol не превышают максимально допустимой температуры  $t_{\text{доп}} = 85^\circ\text{C}$ .

2. Расчетные параметры магнитной линзы обеспечивают ее работу без принудительного жидкостного охлаждения.

3. Графики распределения температуры по сечению катушки в рамках расчетной модели и в

Табл. 2. Сравнение значений температур магнитной линзы

Tab. 2. Comparison of magnetic lens temperature values

Способ определения	Температура наружной поверхности МЛ, °С	Температура внутренней поверхности МЛ, °С
По формуле Ньютона	72.483	72.483
По тепловой схеме замещения	55.469	79.574
В Comsol с заданием мультифизики	54.1	54.1
В Comsol с заданием источника тепла	65.3	65.3

модели Comsol Multiphysics имеют одинаковую форму. Стоит отметить, что подобный график распределения температуры получен в [22], что непосредственным образом указывает на справедливость полученного выражения для распределения температуры по сечению катушки.

Таким образом, в итоге проведенных исследований построена численная модель тепловых процессов в МЛ и определены оптимальные параметры такой линзы, обеспечивающие ее стабильную работу при естественном охлаждении.

#### Список литературы

1. Физико-технические основы современной микрофокусной рентгенодиагностики / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов, В. Б. Бессонов, К. К. Жамова, А. В. Ободовский // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2014. № 9. С. 29–37.

2. Потрахов Н. Н., Гук К. К., Бессонов В. Б. Контроль промышленных изделий методом микрофокусной рентгенографии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89, № 3. С. 31–37. doi: 10.26896/1028-6861-2023-89-3-31-37

3. Баранов И. М., Холопова Е. Д., Атаян А. Ю. Способы фокусировки в трубках с прострельным анодом // 77-я науч.-техн. конф. Санкт-Петерб. НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докл. 2022. № 1 (77). С. 242–244.

4. Shape Design of Magnetic Circuit of the Magnetic Lens Based on Medial Axis Transform / H. Chen, Q. Dong, X. Liu, Z. Li // Micron. 2021. Vol. 145. Art. № 103057. doi: 10.1016/j.micron.2021.103057

5. Amer A., Ahmad K. First and third-order chromatic aberrations in Glaser magnetic lens for object magnetic immersion // Heliyon. 2023. Vol. 9, № 12. Art. № e22825. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22825

6. Musa S., Abbas T. Design and investigate the optical characteristics of single polepiece magnetics lenses. Materials Today: Proc. 2023. Vol. 80. P. 2307–2314. doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.339

7. Practical design of the focusing system for transmission and reflection targets in X-ray sources / L. R. Zhao, Y. M. Cui, L. Y. H. Rui, W. X. Li, J. B. Liu, W. X. Zhao, P. F. Wang // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,

Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2024. Vol. 1067. Art. № 169655. doi: 10.1016/j.nima.2024.169655

8. Моделирование системы электромагнитной фокусировки электронного потока в микрофокусной рентгеновской трубке / М. В. Блудов, Е. Ю. Грачев, Е. А. Козлов, Э. Г. Кочергин, А. А. Сережин, А. А. Трубицын // Вестн. РязГРУ. 2024. № 88. С. 115–128. doi: 10.21667/1995-4565-2023-88-115-128

9. ГОСТ 21428–75. Провода эмалированные круглые медные с температурным индексом 155. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1987. 19 с.

10. 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

11. Иванов С. А., Щукин Г. А. Рентгеновские трубки технического назначения. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 200 с.

12. Microfocus X-ray sources. Hamamatsu. URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/light-and-radiation-sources/microfocus-x-ray-source.html> (дата обращения: 21.10.2025).

13. Микрофокусные трубки компании XRAY WorX. URL: <https://www.x-ray-worx.com/products/microfocus-high-power-x-ray-tubes/> (дата обращения: 21.10.2025).

14. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. 2-е изд. М.: Энергия, 1977. 344 с.

15. Архипова Е. В., Руссова Н. В., Свинцов Г. П. Усовершенствованная методика проектного расчета

броневых электромагнитов постоянного напряжения с внедряющимися якорями // Вестн. Чувашского ун-та. 2013. № 3. С. 156–161.

16. Архипова Е. В., Руссова Н. В., Свинцов Г. П. Расчет температуры нагрева форсированной двухобмоточной броневой магнитной системы постоянного напряжения // Электротехника. 2013. № 12. С. 3–5.

17. Айзен А. М., Выскирка А. С. Метод расчета длительно допустимого тока нагрузки самонесущих изолированных проводов // Электричество. 1992. № 10. С. 5–8.

18. Любчик М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 392 с.

19. Таев И. С. Электрические аппараты: общая теория. М.: Энергия, 1977. 272 с.

20. Hashemi Ali, Qaraei P., Shabani M. Thermal Modelling of the Cylindrical Electromagnets in Transient and Steady-State Modes // COMPEL. 2023. Vol. 42, № 6. P. 1594–1608.

doi: 10.1108/COMPEL-12-2022-0410

21. Гордон А. В., Сливинская А. Т. Электромагниты постоянного тока. М.: Госэнергоиздат, 1960. 445 с.

22. Залесский А. М. Электрические аппараты высокого напряжения. Л.: Госэнергоиздат, 1957. 540 с.

### Информация об авторах

**Блудов Максим Витальевич** – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2023, Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина), аспирант кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В. Ф. Уткина. Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – электротехника; рентгеновские трубки; системы прецизионной магнитной фокусировки; системы электромагнитной фокусировки.

Адрес: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязань, 390005, Россия

E-mail: bludovmaksim@rambler.ru

<https://orcid.org/0009-0004-1811-0344>

**Трубицын Андрей Афанасьевич** – доктор физико-математических наук (2007), профессор (2024), профессор кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В. Ф. Уткина. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – численные методы моделирования электронно-оптических систем; решение задач теории потенциала; поддержка авторской программы "ФОКУС" моделирования систем электронной оптики и аналитических устройств электронной спектроскопии и масс-спектрометрии; энерго-масс-анализ вещества и управления потоками заряженных частиц.

Адрес: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязань, 390005, Россия

E-mail: assur@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9337-8947>

### References

1. Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Bessonov V. B., Zhamova K. K., Obodovskii A. V. Research of Characteristics of the Plasma Cathode Bounded by a Conductive Wall. Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2014, no. 9, pp. 29–37. (In Russ.)

2. Potrakhov N. N., Guk K. K., Bessonov V. B. Control of Industrial Products by Microfocus Radiography. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2023, vol. 98, no. 3, pp. 31–37. (In Russ.)  
doi: 10.26896/1028-6861-2023-89-3-31-37

3. Baranov I. M., Kholopova E. D., Atayan A. Yu. Focusing Methods in Tubes with a Shooting Anode. Proc. of the Scientific and Technical Conf. St Petersburg. 2022, no. 1 (77), pp. 242–244. (In Russ.)

4. Chen H., Dong Q., Liu X., Li Z. Shape Design of Magnetic Circuit of the Magnetic Lens Based on Medial Axis Transform. Micron. 2021, vol. 145, art. no. 103057.  
doi: 10.1016/j.micron.2021.103057

5. Amer A., Ahmad K. First and Third-Order Chromatic Aberrations in Glaser Magnetic Lens for Object Magnetic Immersion. Heliyon. 2023, vol. 9, no. 12, art. no. e22825.  
doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22825

6. Musa S., Abbas T. Design and Investigate the Opti-

cal Characteristics of Single Polepiece Magnetics Lenses. Materials Today: Proc. 2023, vol. 80, pp. 2307–2314.  
doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.339

7. Zhao L. R., Cui Y. M., Rui L. Y. H., Li W. X., Liu J. B., Zhao W. X., Wang P. F. Practical Design of the Focusing System for Transmission and Reflection Targets in X-Ray Sources. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2024, vol. 1067, art. no. 169655.  
doi: 10.1016/j.nima.2024.169655

8. Bludov M. V., Grachev E. Yu., Kozlov E. A., Kochergin E. G., Serezhin A. A., Trubitsyn A. A. Modeling of a System for Electromagnetic Focusing of Electron Flow in Microfocus X-Ray Tube. Bull. of Ryazan State Radio Engineering University. 2024, no. 88, pp. 115–128. (In Russ.)  
doi: 10.21667/1995-4565-2023-88-115-128

9. GOST 21428–75. Enamelled Round Copper Wires with Temperature Index 155. Moscow, State Committee of the USSR for Standards form Publ., 1987, 19 p. (In Russ.)

10. 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. (In Russ.)  
doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121

11. Ivanov S. A., Shchukin G. A. *Rentgenovskie trubki tekhnicheskogo naznacheniya* [Technical X-Ray Tubes]. Leningrad, *Energoatomizdat*, 1989, 200 p. (In Russ.)

12. Microfocus X-Ray Sources. Hamamatsu. Available at: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/light-and-radiation-sources/microfocus-x-ray-source.html> (accessed: 21.10.2025).

13. Product Lines of High Power X-Ray Tubes. Available at: <https://www.x-ray-worx.com/products/microfocus-high-power-x-ray-tubes/> (accessed: 21.10.2025).

14. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of Heat Transfer]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, *Energiya*, 1977, 344 p. (In Russ.)

15. Arkhipova E. V., Russova N. V., Svintsov G. P. Improved Methodology for Design Calculation of Armored Constant Voltage Electromagnets with Embedded Anchors. Bull. Chuvash State University, 2013, no. 3, pp. 156–161. (In Russ.)

16. Arkhipova E. V., Russova N. V., Svintsov G. P. Calculation of the Heating Temperature of a Forced Two-

Winding Armored Magnetic System of Constant Voltage. Electrical Engineering, 2013, no. 12, pp. 3–5. (In Russ.)

17. Aizen A. M., Vyskirka A. S. Method for Calculating the Continuous Permissible Load Current of Self-Supporting Insulated Wires. Electricity, 1992, no. 10, pp. 5–8. (In Russ.)

18. Lyubchik M. A. *Optimal'noe proektirovanie silovykh elektromagnitnykh mekhanizmov* [Optimal Design of Electromagnetic Power Mechanisms]. Moscow, *Energiya*, 1974, 392 p. (In Russ.)

19. Taev I. S. *Elektricheskie apparaty: obshchaya teoriya* [Electrical Apparatus: General Theory]. Moscow, *Energiya*, 1977, 272 p. (In Russ.)

20. Hashemi Ali, Qaraei P., Shabanian M. Thermal Modelling of the Cylindrical Electromagnets in Transient and Steady-State Modes. COMPEL. 2023, vol. 42, no. 6, pp. 1594–1608.

doi: 10.1108/COMPEL-12-2022-0410

21. Gordon A. V., Slivinskaya A. T. *Elektromagnitny postoyannogo toka* [Direct Current Electromagnets]. Moscow, *Gosenergoizdat*, 1960, 445 p. (In Russ.)

22. Zalesskii A. M. *Elektricheskie apparaty vysokogo napryazheniya*. [High Voltage Electrical Devices]. Leningrad, *Gosenergoizdat*, 1957, 540 p. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Maksim V. Bludov**, Master's degree in "Electronics and Nanoelectronics" (2023, Ryazan State Radio Engineering University), Postgraduate student of the Industrial Electronics Department of Ryazan State Radio Engineering University. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: electrical engineering; X-ray tubes; precision magnetic focusing systems; electromagnetic focusing systems.

Address: Ryazan State Radio Engineering University, 59/1, Gagarin St., Ryazan 390005, Russia

E-mail: bludovmaksim@rambler.ru

<https://orcid.org/0009-0004-1811-0344>

**Andrey A. Trubitsyn**, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2007), Professor (2024), Professor of the Department of Industrial Electronics of Ryazan State Radio Engineering University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: numerical methods for modeling electronic-optical systems; solving the problems of potential theory; support for the author's program "Focus" modeling of electronic optics systems and analytical devices of electronic spectroscopy and mass spectrometry; energy-mass analysis of the substance and management of charged particles.

Address: Ryazan State Radio Engineering University, 59/1, Gagarin St., Ryazan 390005, Russia

E-mail: assur@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9337-8947>

---

## Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана, а также их применение в области очистки воды и воздуха

Д. Е. Шашин<sup>1✉</sup>, А. Д. Дьячков<sup>1</sup>, А. Л. Романов<sup>1</sup>, Н. Р. Костик<sup>2</sup>,  
С. А. Тарасов<sup>2</sup>, М. Е. Ильин<sup>2,3</sup>, Н. В. Каманина<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

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

<sup>3</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Гатчина, Россия

<sup>4</sup>АО "НПО ГОИ им. С. И. Вавилова", Санкт-Петербург, Россия

✉ ShashinDE@volgatech.net

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время ведется интенсивный поиск и исследование сред, позволяющих создавать современные газовые сенсоры, а также устройства для очистки воды и воздуха. Среди различных методов очистки воздуха и воды именно фотокатализ занимает перспективное место. Из множества материалов с данным эффектом, благодаря своим свойствам, сильно выделяется диоксид титана. Самый подходящий для получения данного материала метод – реактивное магнетронное распыление.

**Цель работы.** Изучение влияния параметров метода синтеза на варьирование эффективности фотокатализатора на основе  $\text{TiO}_2$  для его дальнейшего применения в области очистки воды и использования в качестве газовых сенсоров.

**Материалы и методы.** В ходе работы были получены две серии по 5 образцов. При получении первой серии варьировалось время напыления (3, 7, 10, 15, 30 мин), а при получении второй – соотношение аргона и кислорода в реактивной смеси (90/10, 70/30, 50/50, 30/70, 10/90 %). Далее каждый образец из обеих серий подвергался облучению в течение 2 ч, а затем исследовался на гидрофильность с помощью прибора ОСА 15 ЕС.

**Результаты.** По результатам исследования были получены две зависимости, а именно: краевого угла смачивания от времени напыления и угла смачивания от содержания кислорода в реактивной смеси. Было выявлено, что данный метод подходит для получения фотокаталитических пленок диоксида титана. Показано, что при увеличении толщины пленки показатель краевого угла смачивания колеблется в пределах от 37 до 45°. Увеличение времени напыления в 10 раз (3 мин против 30 мин) не вызвало каких-то серьезных различий в фотокаталитических и гидрофильных свойствах двух данных образцов. Экспериментально доказано, что наиболее фотоактивные пленки можно синтезировать при соотношении  $\text{Ar}/\text{O}_2$  90/10 и 10/90 %.

**Заключение.** Результаты описываемой работы доказывают, что уже на данном этапе разработанную фотокаталитическую пленку диоксида титана вполне можно рекомендовать для решения ряда задач по очистке воды и применения в качестве газовых сенсоров.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, диоксид титана, магнетронное распыление, фотокатализ, гидрофильность, смачиваемость

**Для цитирования:** Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана, а также их применение в области очистки воды и воздуха / Д. Е. Шашин, А. Д. Дьячков, А. Л. Романов, Н. Р. Костик, С. А. Тарасов, М. Е. Ильин, Н. В. Каманина // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 91–103.  
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-91-103

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

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры фотоники и кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) за проведение экспериментов по смачиванию, результаты которых представлены на рис. 4–7.

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; принята к публикации после рецензирования 05.02.2026; опубликована онлайн 30.04.2026



## Synthesis, Characterization and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide Films for Water and Air Purification

Dmitry E. Shashin<sup>1✉</sup>, Alexey D. Dyachkov<sup>1</sup>, Alexey L. Romanov<sup>1</sup>,  
Nikita R. Kostik<sup>2</sup>, Sergey A. Tarasov<sup>2</sup>, Matvey E. Ilyin<sup>2,3</sup>, Natalia V. Kamanina<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

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

<sup>3</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Gatchina, Russia

<sup>4</sup>Joint Stock Company "Research and Production Corporation n. a. S. I. Vavilov", St Petersburg, Russia

✉ ShashinDE@volgatech.net

### Abstract

**Introduction.** Intensive research is currently focused on identifying materials suitable for the development of advanced gas sensors and systems for water and air purification. Among the diversity of purification approaches, photocatalysis is viewed as a particularly promising method. Considering various potential materials, titanium dioxide stands out due to its physicochemical properties. Reactive magnetron sputtering is considered one of most effective techniques for titanium dioxide deposition.

**Aim.** To investigate the influence of synthesis parameters on the efficiency of a TiO<sub>2</sub>-based photocatalyst for its further application in water purification and gas sensing.

**Materials and methods.** Two series of five samples each were manufactured. In the first series, the sputtering duration was varied (3, 7, 10, 15, 30 min). In the second series, the argon-to-oxygen ratio in the reactive mixture was varied (90/10, 70/30, 50/50, 30/70, 10/90%). Subsequently, all samples in both series were irradiated for 2 h and then evaluated for hydrophilicity using an OSA 15 EC device.

**Results.** Two dependencies, i.e., the contact angle as a function of sputtering duration and the contact angle as a function of oxygen content in the reactive mixture, were established. The employed method was found to be suitable for depositing photocatalytic titanium dioxide films. Upon an increase in film thickness, the contact angle index varies within 37 and 45°. A 10-fold increase in sputtering duration (from 3 to 30 min) caused no significant differences in the photocatalytic and hydrophilic properties of the samples. It was experimentally established that the most photoactive films are synthesized at Ar/O<sub>2</sub> ratios of 90/10 and 10/90%.

**Conclusion.** The developed photocatalytic titanium dioxide film can be recommended for a number of water purification tasks and for use in gas sensors.

**Keywords:** thin films, titanium dioxide, magnetron sputtering, photocatalysis, hydrophilicity, wettability

**For citation:** Shashin D. E., Dyachkov A. D., Romanov A. L., Kostik N. R., Tarasov S. A., Ilyin M. E., Kamanina N. V. Synthesis, Characterization, and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide Films for Water and Air Purification. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 91–103.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-91-103

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

**Acknowledgements.** The authors of this paper would like to express their gratitude to the staff of the Department of Photonics and Department of micro- and nanoelectronics at Saint Petersburg Electrotechnical University for conducting the wetting experiments, the results of which are presented in Fig. 4–7.

Submitted 13.10.2025; accepted 05.02.2026; published online 30.04.2026

**Введение.** В настоящее время ведется интенсивный поиск и исследование сред, позволяющих создавать современные сенсорные устройства, а также отрабатываются подходы и

методы для эффективной работы таких сенсоров. Рассматриваются материалы для газовых сенсоров, например, в [1] изучены нанокристаллы ZnO, декорированные Ag, синтезиро-

ванные низкотемпературным сольватермическим методом, и обосновано их применение для высокочувствительного газового датчика водорода  $H_2$ . В [2] авторы предложили гетероструктуру на основе системы  $SnO_2/ZnO$  для определения  $NO_2$ ; было установлено, что основная причина высоких характеристик тестируемого газа заключается в том, что оксиды  $SnO_2$  и  $ZnO$  образуют N–N-гетеропереходы, которые значительно повышают электрическое сопротивление разрабатываемого датчика по сравнению с чистыми  $SnO_2$  и  $ZnO$ . В данном ключе применяются и полимерные материалы. Так в [3] были выполнены работы по синтезу газового сенсора на основе полимера полианилина для обнаружения газообразного аммиака.

Кроме газовых сенсоров интенсивно развиваются технологии очистки воды от различного рода загрязнений – как природных, так и связанных с жизнедеятельностью человека. В [4] представлены последние достижения в области применения фотокаталитической очистки сточных вод. Внимание авторов было сосредоточено на стратегиях повышения производительности этого метода; обсуждались проблемы и перспективы в такой многообещающей области; приведены данные о фотокаталитической активности материалов на основе серебра, диоксида титана, гетероструктур, содержащих оксиды вольфрама, циркония, а также оксид графена. Сделаны выводы о возможности разработки недорогих и высокоэффективных фотокатализаторов для очистки воды.

Таким образом, на сегодняшний день актуален и своевременно поставлен вопрос очистки воды и воздуха, что занимает важное место в жизни человека, ввиду того, что их загрязнение приводит к серьезным экологическим проблемам и влияет на здоровье населения. Учитывая растущее количество и сложность промышленных выбросов, а также недостаточную эффективность обычных методов очистки, существует острая необходимость в технологиях для улучшения фильтрации как сточных вод, содержащих различные загрязняющие вещества, так и воздуха, имеющего в составе множество опасных для человека летучих соединений [7].

Заметим, что среди различных методов очистки воздуха и воды именно фотокатализ

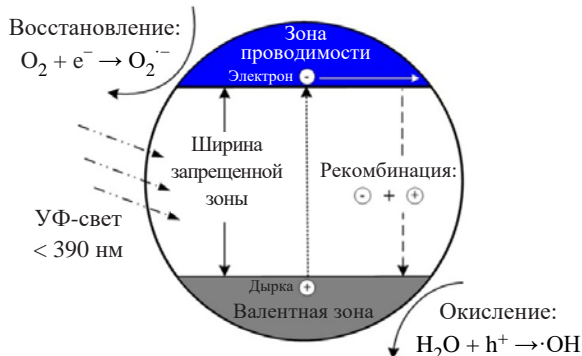


Рис. 1. Схематическое изображение механизма фотокатализа диоксида титана под действием падающего света

Fig. 1. Schematic representation of the photocatalytic mechanism of titanium dioxide under the action of incident light

занимает перспективное место. Данный эффект основан на генерации высокорективных радикалов на фотокатализаторе под воздействием подходящего источника света. На рис. 1 показан физический принцип данного эффекта [8].

На роль фотокатализатора, благодаря своим свойствам, хорошо подходит диоксид титана ( $TiO_2$ ). Его применение достаточно широко. К примеру, в [5] описана гетероструктура  $TiO_2NTs/rGO$ , используемая для повышения чувствительности к газу  $NO_2$ . Эти улучшения объясняются увеличением удельной поверхности, более высокой концентрацией хемосорбируемых форм кислорода и образованием  $p$ – $n$ -гетеропереходов между  $TiO_2$  и  $rGO$  в нанокompозитах. Это исследование дает ценную информацию для разработки газовых сенсоров на основе системы  $TiO_2$ /графен для обнаружения окисляющих газов даже при комнатной температуре. Фотокаталитические свойства диоксида титана также полезны и применяются во многих областях, таких, как медицина, экология, пищевая промышленность, строительство и др. [9]. Фотоиндуцированный фотокатализ пленок  $TiO_2$  может стать основой легко очищаемых поверхностей, самоочищающихся окон, антизапотеваяющих стекол, самостерилизующихся и антибактериальных плиток или фотокаталитических устройств для очистки воздуха и воды [10]. При УФ-облучении  $TiO_2$  может разлагать такие органические вещества, как красители, фенол, нефть и другие загрязнители [11].

Естественно, на современном этапе существуют многообразные технологии формирования фотокаталитических пленок  $TiO_2$ , однако

магнетронное распыление получило наибольшее распространение за счет возможности гибкого влияния на технологические параметры и, как следствие, на повышение выходных фотокаталитических свойств  $\text{TiO}_2$ . Наибольшее влияние на фотокаталитические свойства оказывают такие параметры, как соотношение аргона к кислороду в газовой смеси и время напыления покрытия [12]. Данные параметры могут сильно повлиять на кристаллическую структуру пленок. Так, увеличение в газовой смеси кислорода приводит к тому, что пленка становится более аморфной, и наоборот: при увеличении аргона – более кристаллической [13]. Изменение времени напыления подложки ухудшает оптические свойства пленок, влияя на их пропускание в видимом диапазоне [14].

Изучение влияния данных параметров технологического процесса на свойства пленок является важной задачей в вопросе получения эффективных фотокатализаторов. В связи с этим целью описываемой работы было изучение влияния параметров метода синтеза на варьирование эффективности фотокатализатора на основе  $\text{TiO}_2$ . Для исследования данного вопроса было сформировано две серии пленок. Варьировалось время напыления и соотношение аргона и кислорода в реактивной смеси. В качестве одного из методов контроля выступало измерение краевого угла смачивания воды на поверхности пленки  $\text{TiO}_2$ . Заметим, что смачиваемость поверхности, действительно, является одним из показателей изменения свойств материалов, что используется и при работе с оксидами титана; например, в [6] состав  $\text{TiO}_2$ -вода с массовой долей наночастиц оксида титана в диапазоне  $\sim 0.001 \dots 0.1$  % позволял варьировать теплопередачу и число осаждаемых наночастиц, что влияло на супергидрофобные свойства медных поверхностей.

**Методы получения и исследования пленок.** Осаждение тонкого слоя фотокатализатора часто осуществляется золь-гель-методом или химическим осаждением паров, однако можно использовать и метод физического осаждения паров, например магнетронное распыление. Магнетронное распыление – это плазменный процесс тонкослойного осаждения, используемый для получения широкого спек-

тра металлических и керамических покрытий. Он воспроизводим, хорошо масштабируется и обеспечивает превосходный контроль над химическими и морфологическими свойствами осажденных материалов. Магнетронное распыление – промышленно востребованный метод для получения фотокаталитических покрытий, поскольку позволяет надежно контролировать такие параметры, как кристалличность, состав и толщина, применимо для нескольких типов фотокатализаторов и обеспечивает хорошую адгезию. Для получения экспериментальных образцов использовалось реактивное магнетронное распыление, которое отличается тем, что помимо инертного газа (аргона) в камеру также подается реактивный газ (кислород).

В данном исследовании серии тонких пленок  $\text{TiO}_2$  формировались на модернизированной под магнетронное распыление вакуумной установке УВН-71ПЗ. Высокий вакуум в камере достигался с помощью последовательно включенных форвакуумного и паромасляного насосов. Схема установки показана на рис. 2 [15].

Установка предназначена для разработки и экспериментального исследования процессов получения пленок различных материалов в научно-исследовательских и учебных целях. Система работает в диапазоне измерения показаний давления без изменения предела измерений от 60 до  $10^{-6}$  Па. Магнетронные блоки питания работают в импульсном режиме, имеют

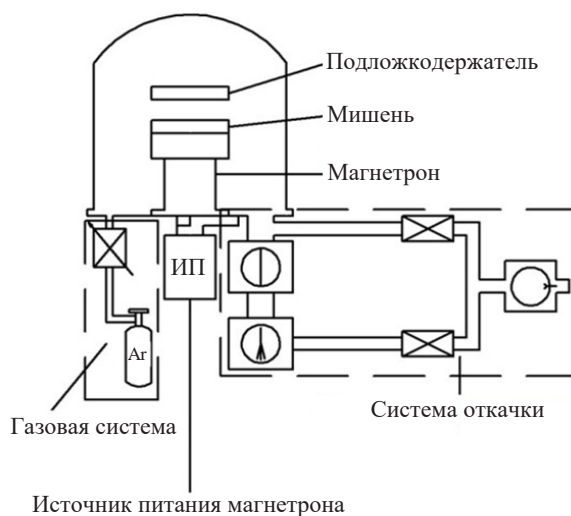


Рис. 2. Схема установки магнетронного распыления УВН-71ПЗ  
Fig. 2. Diagram of the UVN-71P3 magnetron sputtering system

комплексную защиту от короткого замыкания и систему гашения микродуг.

Для формирования экспериментальных серий пленок  $\text{TiO}_2$  используется кислород и аргон чистотой 99.9 %. В качестве подложек берется стекло с размерами  $60 \times 48 \times 2$  мм.

Процесс нанесения пленок оксида проходит в следующих условиях. Для серии подложек с изменением соотношения аргона к кислороду: а) давление  $\text{Ar}$  в камере – от 90 до 10 %; б) давление  $\text{O}_2$  в камере – от 10 до 90 %; в) рабочее давление – 1 Па; г) ток магнетрона – 1 А; д) температура нагрева подложек – 200 °С; е) время осаждения – 10 мин. Для серии подложек с изменением времени напыления: а) давление  $\text{Ar}$  в камере – 70 %; б) давление  $\text{O}_2$  в камере – 30 %; в) рабочее давление – 1 Па; г) ток магнетрона – 1 А; д) температура нагрева подложек – 200 °С; е) время осаждения – 3, 7, 10, 15 и 30 мин. На рис. 3 представлена схема процесса напыления пленок диоксида титана.

Фотокаталитические свойства пленок исследовались методом измерения краевого угла смачивания капли дистиллированной воды на поверхности пленки диоксида титана посредством устройства ОСА 15 ЕС.

ОСА 15 ЕС представляет собой прибор для измерения краевого угла смачивания и анализа контура капли с последующим определением полярной и дисперсионной составляющих поверхностной энергии исследуемого материала методом ОWRК (Owens–Wendt–Rabel–Kaelble – Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кьелбле) [16], если это необходимо для конкретной технической задачи.

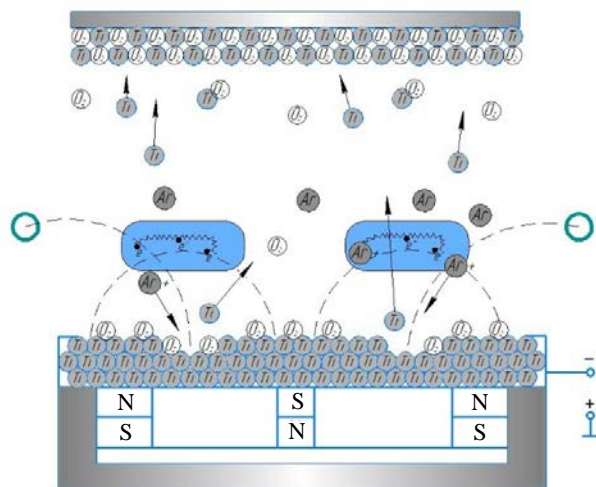


Рис. 3. Схема процесса напыления пленок диоксида титана

Fig. 3. Diagram of the titanium dioxide film sputtering process

Данное устройство позволяет измерять (и отображать найденные значения на экране) краевой угол смачивания на ровных, выпуклых и вогнутых поверхностях, а также пользоваться банком данных различных веществ для всех методов расчета при сравнении с литературными ссылками.

Засветка образцов производилась при помощи УФ-излучателя, состоящего из двух УФ-ламп мощностью 15 В, установленного на опоре с регулируемой высотой. Образцы с варьируемым временем напыления были размещены под УФ-излучателем, расположенным на расстоянии 10 см от середины источника излучения (середина толщины колбы светильника). Засветка производилась в течение 1 ч, после чего к ним были добавлены образцы с варьируемым соотношением  $\text{Ar}/\text{O}_2$ . Спустя час после размещения второй серии образцов образцы первой серии были убраны из-под воздействия УФ-излучателя, а оставшиеся образцы облучались в течение еще 1 ч.

**Результаты исследования.** На рис. 4 и 5 представлены замеры краевого угла смачивания для образцов, полученных с варьированием времени напыления до и после облучения УФ.

Как видно из рис. 4, тонкие пленки диоксида титана не обладают какой-либо гидрофильностью до облучения УФ, а даже наоборот, скорее гидрофобны, как и стеклянная подложка, на которую они нанесены. В то же время, стоит отметить, что облучение в УФ-области вызывает проявление тенденции смены гидрофобности на гидрофильность: угол смачивания изменяется от  $\sim 80 \dots 90^\circ$  до  $\sim 35 \dots 40^\circ$ , т. е. в  $\sim 2$  раза (рис. 5).

В табл. 1 представлены сводные данные по измерению краевого угла смачивания образцов

Табл. 1. Данные по измерению угла смачивания для первой серии пленок

Tab. 1. Measurement data on contact angle for the first series of films

Краевой угол смачивания ( $\theta$ ), ...°	Время напыления ( $t_{\text{нап}}$ ), мин				
	3	7	10	15	30
	44.3	37.35	34.2	48.95	40.1
	35.75	32.65	39.9	41.7	44.0
	41.35	34.45	39.7	44.3	46.0
	32.2	37.8	36.35	48.1	39.55
	31.9	38.55	36.15	43.0	31.4
Среднее значение	37.7	36.16	37.26	45.21	40.21

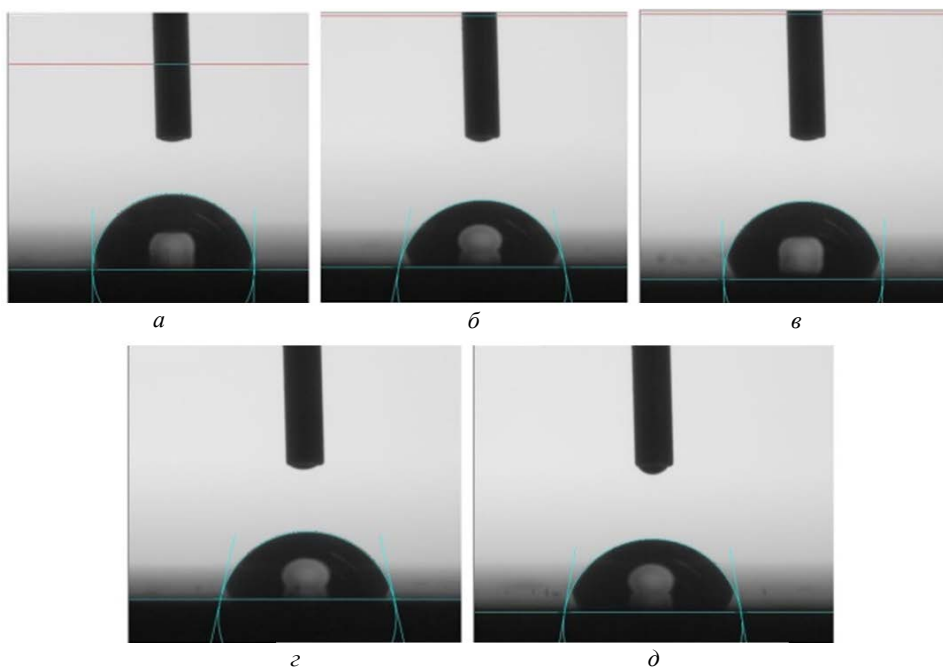


Рис. 4. Серия пленок с варьированием времени напыления до облучения УФ, мин:  
 $a - 3; \bar{b} - 7; \bar{в} - 10; \bar{г} - 15; \bar{д} - 30$

Fig. 4. Series of films with varying deposition duration prior to UV irradiation, min:  
 $a - 3; \bar{b} - 7; \bar{в} - 10; \bar{г} - 15; \bar{д} - 30$

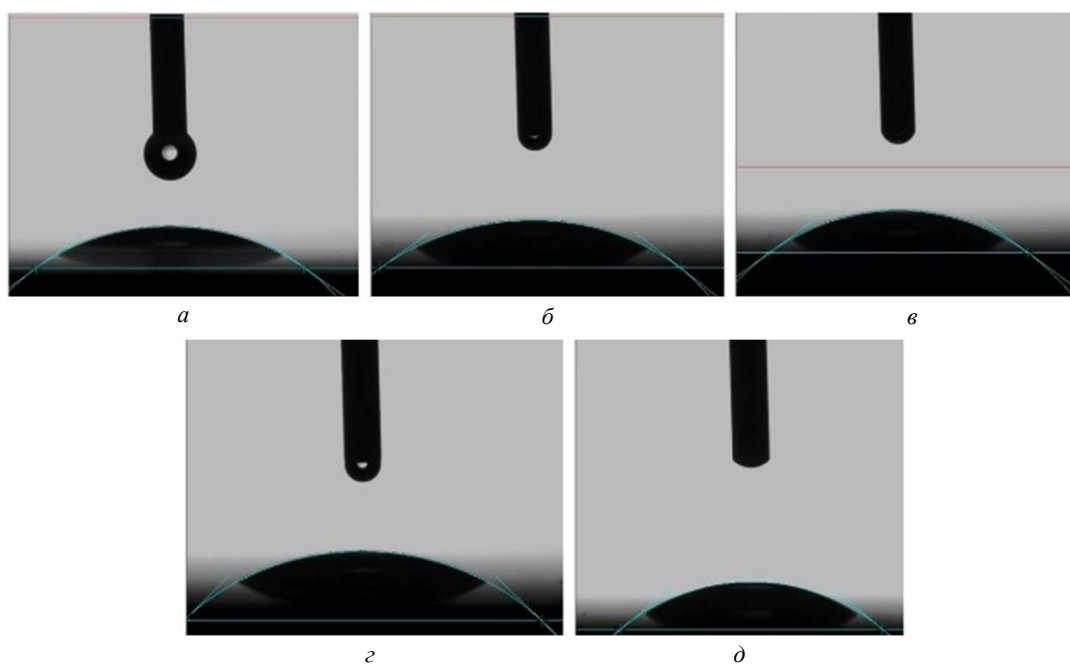


Рис. 5. Серия пленок с варьированием времени напыления после облучения УФ, мин:  
 $a - 3; \bar{б} - 7; \bar{в} - 10; \bar{г} - 15; \bar{д} - 30$

Fig. 5. Series of films with varying deposition duration after UV irradiation, min:  
 $a - 3; \bar{б} - 7; \bar{в} - 10; \bar{г} - 15; \bar{д} - 30$

данной серии пленок. Измерения проводились пятикратно, и подсчитывалось среднее значение.

На рис. 6 и 7 представлены изображения с измеренным углом смачивания для образцов, полученных с варьированием состава реактив-

ной смеси до и после облучения, как и в случае с предыдущей серией.

Как и в случае с первой серией, на рис. 6 наблюдается гидрофобность пленок непосредственно перед облучением, но, как видно по по-

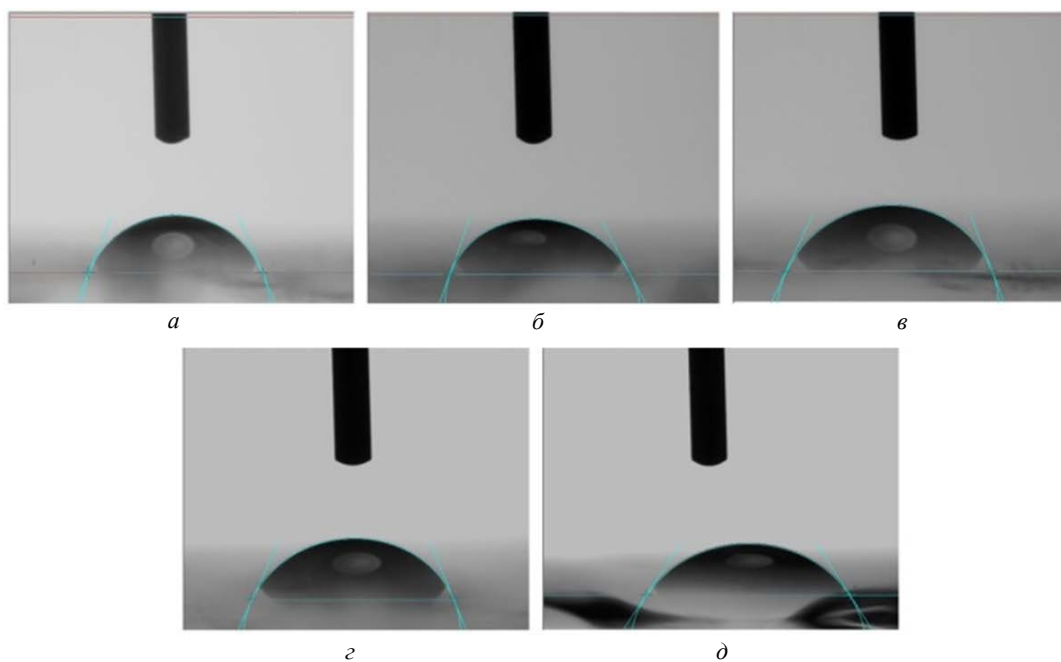


Рис. 6. Серия пленок с варьированием соотношения Ar/O<sub>2</sub> до облучения УФ, %:  
 а – 90/10; б – 70/30; в – 50/50; г – 30/70; д – 10/90

Fig. 6. Series of films with varying Ar/O<sub>2</sub> ratio prior to UV irradiation, %:  
 а – 90/10; б – 70/30; в – 50/50; г – 30/70; д – 10/90

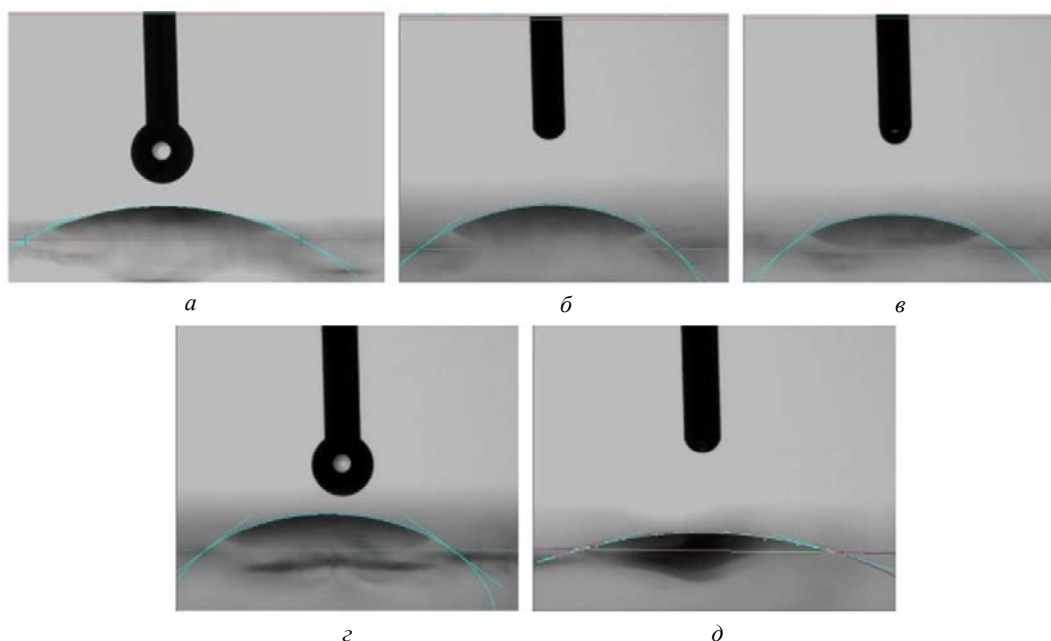


Рис. 7. Серия пленок с варьированием соотношения Ar/O<sub>2</sub> после облучения УФ, %:  
 а – 90/10; б – 70/30; в – 50/50; г – 30/70; д – 10/90

Fig. 7. Series of films with varying Ar/O<sub>2</sub> ratio after UV irradiation, %:  
 а – 90/10; б – 70/30; в – 50/50; г – 30/70; д – 10/90

следнему образцу (рис. 6, д), увеличение кислорода улучшает гидрофильные свойства покрытий.

В табл. 2 представлены сводные данные по измерению краевого угла смачивания образцов данной серии пленок. Измерения проводились

**Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана, а также их применение в области очистки воды и воздуха**  
**Synthesis, Characterization, and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide Films for Water and Air Purification**

пятикратно, и подсчитывалось среднее значение.

Изображения серий подложек до и после облучения УФ-лампой показывают, прежде всего, возможность использования полученных пленок диоксида титана в качестве фотокатализатора.

Табл. 2. Данные по измерению угла смачивания для второй серии пленок

Tab. 2. Measurement data on contact angle for the second series of films

Краевой угол смачивания ( $\theta$ ), ...°	Соотношение аргона к кислороду, %				
	90/10	70/30	50/50	30/70	10/90
	28.0	36.6	32.05	40.7	21.4
	27.5	32.2	37.9	42.65	16.0
	27.6	39.8	39.95	36.5	16.1
	27.7	46.0	38.8	26.5	12.3
	25.65	43.2	31.95	31.65	21.3
Среднее значение	27.29	39.56	36.13	35.6	17.42

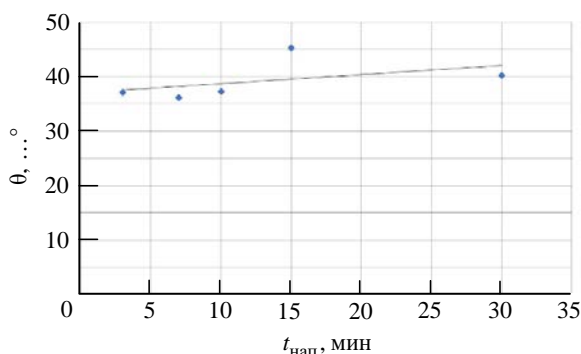


Рис. 8. Зависимость краевого угла смачивания от времени напыления

Fig. 8. Dependence of contact angle on sputtering duration

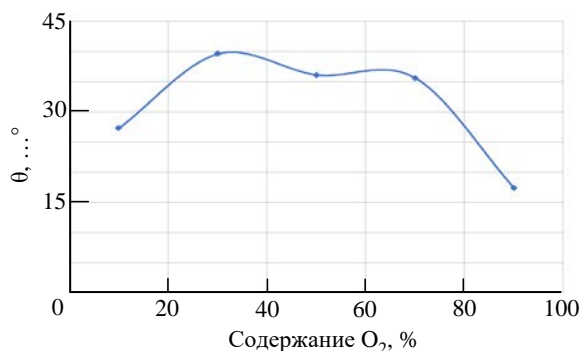


Рис. 9. Зависимость краевого угла смачивания от процента кислорода в смеси

Fig. 9. Dependence of contact angle on oxygen content in the mixture

На рис. 8 и 9 представлены зависимости краевого угла смачивания от исследуемых параметров, полученные при измерении после УФ-облучения.

Из графика на рис. 8 видно, что при увеличении толщины пленки показатель краевого угла смачивания колеблется в пределах от 37 до 45°. Увеличение времени напыления в 10 раз (3 мин против 30 мин) не вызвало каких-то серьезных различий в фотокаталитических и гидрофильных свойствах двух данных образ-

цов, т. е. данный параметр не является значимым. Это соответствует данным, представленным в работе [17]. В ней отмечается, что гидрофильные свойства пленки не зависят от толщины, если она превышает 20 нм. Пленки толщиной меньше данного порога показывают изменение гидрофильности при изменении материала подложки.

Из графика на рис. 9 видно, что наиболее фотоактивные пленки можно синтезировать при соотношении Ar/O<sub>2</sub> 10/90 %. Данный результат согласуется с полученными ранее данными [18–20]. Как указано в [17], анатазные пленки можно получить при высоком содержании кислорода (более 50 %) и давлении от 0.7 до 2 Па. Следовательно, образец с самым высоким содержанием кислорода (рис. 9) содержит в составе больше анатаза и поэтому обладает лучшими фотокаталитическими свойствами.

**Закключение.** В ходе эксперимента по формированию фотокаталитических тонких пленок диоксида титана методом реактивного магнетронного распыления было получено две серии образцов с варьированием времени напыления и соотношения Ar/O<sub>2</sub> в реактивной смеси соответственно. С помощью прибора ОСА 15 ЕС измерялся краевой угол смачивания образцов (см. рис. 4–7), значения которого представлены в табл. 1 и 2.

Для двух серий образцов были получены зависимости краевого угла смачивания от варьируемых параметров. Данные графики представлены на рис. 8 и 9.

По зависимости угла смачивания от времени напыления можно сделать вывод, что существенное изменение времени напыления не приводит к каким-либо серьезным вариациям значения угла. При увеличении толщины пленки показатель краевого угла смачивания колеблется в пределах от 37 до 45°. Это означает, что данный параметр не является значимым.

На графике для второй серии образцов (с варьированием соотношения аргона к кислороду в смеси) наименьшее значение угла смачивания наблюдается для образцов, полученных с содержанием кислорода в реактивной смеси равным 90 %. Это показывает, что при данных условиях содержание анатаза в образцах значительно выше, чем в образцах, полученных с большим содержанием аргона.

Анализируя результаты описанной работы следует отметить, что, естественно, для расширения получаемых знаний о материалах при использовании приборного парка стоит применять и другие методы исследования, кроме прибора

ОСА 15 ЕС. Однако уже на данном этапе вполне возможно рекомендовать разработанную фотокаталитическую пленку диоксида титана для решения ряда задач по очистке воды и применения в качестве газовых сенсоров.

#### Авторский вклад

**Шашин Дмитрий Евгеньевич** – постановка серии опытов по формированию пленок оксида титана.

**Дьячков Алексей Дмитриевич** – проведение технологического процесса формирования фотокаталитических тонких пленок диоксида титана.

**Романов Алексей Леонидович** – проведение технологического процесса формирования фотокаталитических тонких пленок диоксида титана.

**Костик Никита Русланович** – проведение опытов по смачиваемости поверхности фотокаталитических тонких пленок диоксида титана.

**Тарасов Сергей Анатольевич** – постановка серии опытов по исследованию угла смачиваемости исследуемых образцов; обработка результатов.

**Ильин Матвей Евгеньевич** – проведение опытов по смачиваемости поверхности фотокаталитических тонких пленок диоксида титана.

**Каманина Наталия Владимировна** – анализ; физическое обоснование и формулирование результатов проведенного исследования.

#### Author's contribution

**Dmitry E. Shashin**, organisation of experiments, interpretation of data obtained, and editing of the article.

**Alexey D. Dyachkov**, conducting experiments on the formation of photocatalytic thin films of titanium dioxide.

**Alexey L. Romanov**, conducting experiments on the formation of photocatalytic thin films of titanium dioxide.

**Nikita R. Kostik**, conducting experiments on the wettability of the surface of photocatalytic thin films of titanium dioxide.

**Sergey A. Tarasov**, setting up a series of experiments to study the wetting angle of the samples under study, interpreting of the results, editing of the article.

**Matvey E. Ilyin**, conducting experiments on the wettability of the surface of photocatalytic thin films of titanium dioxide.

**Natalia V. Kamanina**, interpreting the data obtained and editing the article.

#### Список литературы

1. Ag decorated ZnO nanocrystallines synthesized by a low-temperature solvothermal method and their application for high response H<sub>2</sub> gas sensor / Z. Li, G. Zhang, W. Gao, R. Zhao, Y. Wang // J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2019. Vol. 30, № 20. P. 18959–18969.

doi: 10.1007/s10854-019-02253-5

2. Sputtered SnO<sub>2</sub>/ZnO heterostructures for improved NO<sub>2</sub> gas sensing properties / B. Sharma, A. Sharma, M. Joshi, J.-H. Myung // Chemosensors. 2020. Vol. 8, № 3. Art. № 67.

doi: 10.3390/chemosensors8030067

3. Synthesis of polyaniline (printable nanoink) gas sensor for the detection of ammonia gas / P. Dipak, D. C. Tiwari, A. Samadhiya, N. Kumar, T. Biswajit, P. A. Singh, R. K. Tiwari // J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2020. Vol. 31. P. 22512–22521.

doi: 10.1007/s10854-020-04760-2

4. Recent advances of photocatalytic application in water treatment: A review / G. Ren, H. Han, Y. Wang, S. Liu, J. Zhao, X. Meng, Z. Li // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, № 7. Art. № 1804.

doi: 10.3390/nano11071804

5. Improving the NO<sub>2</sub> gas sensing performances at room temperature based on TiO<sub>2</sub> NTs/rGO heterojunction nanocomposites / Y. Ling, Y. Yu, C. Tian, C. Zou // Nanomaterials. 2024. Vol. 14, № 22. Art. № 1844.

doi: 10.3390/nano14221844

6. Effect of surface wettability on nanoparticle deposition during pool boiling on laser-textured copper surfaces / J. Berce, A. Hadžić, M. Može, K. Arhar, H. Gjerkeš, M. Zupancic, I. Golobic // Nanomaterials. 2024. Vol. 14, № 3. Art. № 311.

doi: 10.3390/nano14030311

7. Photocatalysis / R. Ameta, M. S. Solanki, S. Benjamin, S. C. Ameta // Advanced oxidation processes for wastewater treatment. New York: Academic Press, 2018. P. 135–175.

doi: 10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1

8. A review on the pathways of the improved structural characteristics and photocatalytic performance of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) thin films fabricated by the magnetron-sputtering technique / Y.-H. Wang, K. H. Rahman, C.-C. Wu, K.-C. Chen // Catalysts. 2020. Vol. 10, № 6. Art. № 598.

doi: 10.3390/catal10060598

9. Amorphous TiO<sub>2</sub> nanostructures: synthesis, fundamental properties and photocatalytic applications / S. Sun, P. Song, J. Cui, S. Liang // *Catalysis Science & Technology*. 2019. Vol. 9, № 16. P. 4198–4215. doi: 10.1039/C9CY01020C
10. Cost comparison of advanced oxidation processes for wastewater treatment using accumulated oxygen-equivalent criteria / E. Mousset, W. H. Loh, W. S. Lim, L. Jarry, Z. Wang, O. Lefebvre // *Water Research*. 2021. Vol. 200. Art. № 117234. doi: 10.1016/j.watres.2021.117234
11. Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis / Z. Huang, P.-C. Maness, D. M. Blake, E. J. Wolfrum, S. L. Smolinski, W. A. Jacoby // *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2000. Vol. 130, № 2–3. P. 163–170. doi: 10.1016/S1010-6030(99)00205-1
12. Effect of deposition parameters on properties of TiO<sub>2</sub> films deposited by reactive magnetron sputtering / B. Wang, S. Wei, L. Guo, Y. Wang, Y. Liang, B. Xu, F. Pan, A. Tang, X. Chen // *Ceramics Intern.* 2017. Vol. 43, № 14. P. 10991–10998. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.05.139
13. Sirghi L., Hatanaka Y. Hydrophilicity of amorphous TiO<sub>2</sub> ultra-thin films // *Surface Science*. 2003. Vol. 530, № 3. P. L323–L327. doi: 10.1016/S0039-6028(03)00397-2
14. Martinez A. I., Acosta D. R., Lopez A. A. Effect of deposition methods on the properties of photocatalytic TiO<sub>2</sub> thin films prepared by spray pyrolysis and magnetron sputtering // *J. of Physics: Condensed Matter*. 2004. Vol. 16, № 22. P. S2335–S2344. doi: 10.1088/0953-8984/16/22/036
15. Shashin D. E., Sushentsov N. I. Development of manufacturing technology of photodielectric sensitive element of ultraviolet range on the basis of thin films of zinc oxide // *Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2019. № 6. С. 99–109. doi: 10.18698/0236-3933-2019-6-99-109
16. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers // *J. of Applied Polymer Science*. 1969. Vol. 13, № 8. P. 1741–1747. doi: 10.1002/app.1969.070130815
17. Шаповалов В. И. Нанопорошки и пленки оксида титана для фотокатализа (обзор) // *Физика и химия стекла*. 2010. Т. 36, № 2. С. 145–194.
18. Шашин Д. Е., Дьячков А. Д. Формирование фотокаталитических пленок TiO<sub>2</sub> методом реактивного магнетронного распыления с применением квазизамкнутого пространства // *Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2024. № 3 (148). С. 75–90.
19. Особенности получения фотокаталитических тонких пленок TiO<sub>2</sub> методом магнетронного распыления / Н. И. Сушенцов, Д. Е. Шашин, Е. В. Михеева, А. Д. Дьячков // *Вакуумная техника и технологии 2022: тр. 29-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 21–23 июня 2022. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2022. С. 282–285.*
20. Дьячков А. Д., Шашин Д. Е., Романов А. Л. Исследование морфологии поверхности фотокаталитических тонких пленок диоксида титана // *Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы IX Междунар. науч. конф., Донецк, 15–17 окт. 2024. Донецк: Изд-во ДонГУ, 2024. С. 95–97.*

### Информация об авторах

**Шашин Дмитрий Евгеньевич** – кандидат технических наук (2020), доцент (2024), заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры Поволжского государственного технологического университета. Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; фотокатализ; самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия  
E-mail: ShashinDE@volgatech.net  
<https://orcid.org/0000-0002-8222-2824>

**Дьячков Алексей Дмитриевич** – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2023, Поволжский государственный технологический университет), аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Поволжского государственного технологического университета. Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; фотокатализ.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия  
E-mail: addyachkov@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0007-6286-8330>

**Романов Алексей Леонидович** – бакалавр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2024, Поволжский государственный технологический университет), заведующий лабораторией кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Поволжского государственного технологического университета. Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; тонкопленочные структуры.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия  
E-mail: romanov.tan2014@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0007-9981-511X>

**Костик Никита Русланович** – кандидат технических наук (2024), доцент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина).

Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – возобновляемая энергетика; технико-экономический анализ методов повышения эффективности гибридных систем ВИЭ; фотовольтаика.

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

E-mail: nrkostik@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5146-8549>

**Тарасов Сергей Анатольевич** – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; физика и оптика полупроводников; светоизлучающие и фоточувствительные приборы.

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

E-mail: satarasov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6321-0019>

**Ильин Матвей Евгеньевич** – бакалавр по направлению "Фотоника и оптоинформатика" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), магистрант кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Лаборант-исследователь Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – нанотехнологии; фотоника; жидкие кристаллы; фуллерены и др. наночастицы; взаимодействие лазерного излучения с веществом; граница раздела; покрытия.

Адрес: Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", мкр. Орлова роща, д. 1, Гатчина, 188300, Россия

E-mail: ilin\_matwei@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4470-2779>

**Каманина Наталия Владимировна** – доктор физико-математических наук (2001), начальник отдела "Фотофизика наноструктурированных материалов и устройств" АО "НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова" (Санкт-Петербург), профессор (2001) кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ведущий научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (Гатчина). Автор более 340 научных работ. Сфера научных интересов: фотофизика; нанотехнологии; наночастицы и нанотрубки; полимеры; жидкие кристаллы; покрытия; взаимодействие излучения с веществом.

Адрес: Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", мкр. Орлова роща, д. 1, Гатчина, 188300, Россия

E-mail: nvkamanina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

## References

1. Li Z., Zhang G., Gao W., Zhao R., Wang Y. Ag Decorated ZnO Nanocrystallines Synthesized by a Low-Temperature Solvothermal Method and Their Application for High Response H<sub>2</sub> Gas Sensor. *J. of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019, vol. 30, no. 20, pp. 18959–18969. doi: 10.1007/s10854-019-02253-5
2. Sharma B., Sharma A., Joshi M., Myung J.-H. Sputtered SnO<sub>2</sub>/ZnO Heterostructures for Improved NO<sub>2</sub> Gas Sensing Properties. *Chemosensors*. 2020, vol. 8, no. 3, art. no. 67. doi: 10.3390/chemosensors8030067
3. Dipak P., Tiwari D. C., Samadhiya A., Kumar N., Biswajit T., Singh P. A., Tiwari R. K. Synthesis of Poly-aniline (Printable Nanoink) Gas Sensor for the Detection of Ammonia Gas. *J. of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020, vol. 31, pp. 22512–22521. doi: 10.1007/s10854-020-04760-2
4. Ren G., Han H., Wang Y., Liu S., Zhao J., Meng X., Li Z. Recent Advances of Photocatalytic Ap-  
plication in Water Treatment: A Review. *Nanomaterials*. 2021, vol. 11, no. 7, art. no. 1804. doi: 10.3390/nano11071804
5. Ling Y., Yu Y., Tian C., Zou C. Improving the NO<sub>2</sub> Gas Sensing Performances at Room Temperature Based on TiO<sub>2</sub> NTs/rGO Heterojunction Nanocomposites. *Nanomaterials*. 2024, vol. 14, no. 22, art. no. 1844. doi: 10.3390/nano14221844
6. Berce J., Hadžić A., Može M., Arhar K., Gjerkeš H., Zupancić M., Golobic I. Effect of Surface Wettability on Nanoparticle Deposition During Pool Boiling on Laser-Textured Copper Surfaces. *Nanomaterials*. 2024, vol. 14, no. 3, art. no. 311. doi: 10.3390/nano14030311
7. Ameta R., Solanki M. S., Benjamin S., Ameta S. C. Photocatalysis: Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. New York, Academic Press, 2018, pp. 135–175. doi: 10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1
8. Wang Y.-H., Rahman K. H., Wu C.-C., Chen K.-C. A Review on the Pathways of the Improved Structural

**Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана,**

**а также их применение в области очистки воды и воздуха**

**Synthesis, Characterization, and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide Films for Water and Air Purification**

Characteristics and Photocatalytic Performance of Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Thin Films Fabricated by the Magnetron-Sputtering Technique. *Catalysts*. 2020, vol. 10, no. 6, art. no. 598.

doi: 10.3390/catal10060598

9. Sun S., Song P., Cui J., Liang S. Amorphous TiO<sub>2</sub> Nanostructures: Synthesis, Fundamental Properties and Photocatalytic Applications. *Catalysis Science & Technology*. 2019, vol. 9, no. 16, pp. 4198–4215.

doi: 10.1039/C9CY01020C

10. Mousset E., Loh W. H., Lim W. S., Jarry L., Wang Z., Lefebvre O. Cost Comparison of Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment Using Accumulated Oxygen-Equivalent Criteria. *Water Research*. 2021, vol. 200, art. no. 117234.

doi: 10.1016/j.watres.2021.117234

11. Huang Z., Maness P.-C., Blake D. M., Wolfrum E. J., Smolinski S. L., Jacoby W. A. Bactericidal Mode of Titanium Dioxide Photocatalysis. *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2000, vol. 130, no. 2–3, pp. 163–170.

doi: 10.1016/S1010-6030(99)00205-1

12. Wang B., Wei S., Guo L., Wang Y., Liang Y., Xu B., Pan F., Tang A., Chen X. Effect of Deposition Parameters on Properties of TiO<sub>2</sub> Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering. *Ceramics Intern.* 2017, vol. 43, no. 14, pp. 10991–10998.

doi: 10.1016/j.ceramint.2017.05.139

13. Sirghi L., Hatanaka Y. Hydrophilicity of Amorphous TiO<sub>2</sub> Ultra-Thin Films. *Surface Science*. 2003, vol. 530, no. 3, pp. L323–L327.

doi: 10.1016/S0039-6028(03)00397-2

14. Martinez A. I., Acosta D. R., Lopez A. A. Effect of Deposition Methods on the Properties Of Photocatalytic TiO<sub>2</sub> Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis and Magnetron Sputtering. *J. of Physics: Condensed Matter*. 2004, vol. 16, no. 22, pp. S2335–S2344.

doi: 10.1088/0953-8984/16/22/036

15. Shashin D. E., Sushentsov N. I. Development of Manufacturing Technology of Photodielectric Sensitive Element of Ultraviolet Range on the Basis of Thin Films of Zinc Oxide. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering*. 2019, no. 6, pp. 99–109.

doi: 10.18698/0236-3933-2019-6-99-109

16. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. *J. of Applied Polymer Science*. 1969, vol. 13, no. 8, pp. 1741–1747.

doi: 10.1002/app.1969.070130815

17. Shapovalov V. I. Nanopowders and Films of Titanium Oxide for Photocatalysis: A Review. *Glass Physics and Chemistry*. 2010, vol. 36, no. 2, pp. 121–157.

doi: 10.1134/S108765961002001X

18. Shashin D. E., Dyachkov A. D. TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Film Formation by Reactive Magnetron Sputtering Using the Quasi-Closed Space. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering*. 2024, vol. 148, no. 3, pp. 75–90. (In Russ.)

19. Sushentsov N. I., Shashin D. E., Mikheeva E. V., Dyachkov A. D. *Osobennosti polucheniya fotokataliticheskikh tonkikh plenok TiO<sub>2</sub> metodom magnetronnogo raspyleniya* [Features of Obtaining Photocatalytic Thin Films of TiO<sub>2</sub> by Magnetron Sputtering]. 29<sup>th</sup> All-Russ. Conf. with Intern. Participation. *Vacuum Technique and Technology – 2022*, St Petersburg, Russia, 21–23 June 2022. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2022, pp. 282–285. (In Russ.)

20. Dyachkov A. D., Shashin D. E., Romanov A. L. *Issledovanie morfologii poverkhnosti fotokataliticheskikh tonkikh plenok dioksida titana* [Study of the Surface Morphology of Photocatalytic Thin Films of Titanium Dioxide]. *Donetsk Readings 2024: Education, Science, Innovation, Culture and Contemporary Challenges: Proc. of the IX Intern. Scientific Conf.*, Donetsk, 15–17 Oct. 2024. Donetsk, *Izd-vo DonGU*, 2024, pp. 95–97. (In Russ.)

### Information about the authors

**Dmitry E. Shashin**, Cand. Sci. (2020), Associate Professor (2024), Head of the Department of Radio Equipment Design and Production Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola). The author of more than 90 publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; photocatalysis; and self-propagating high-temperature synthesis.

Address: Volga State University of Technology, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: ShashinDE@volgatech.net

<https://orcid.org/0000-0002-8222-2824>

**Alexey D. Dyachkov**, Master's degree in electronics and nanoelectronics (2023, Volga State University of Technology), Postgraduate student of the Department of Radio Equipment Design and Manufacturing of Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola). The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; photocatalysis.

Address: Volga State University of Technology, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: addyachkov@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-6286-8330>

**Alexey L. Romanov**, Bachelor's degree in electronics and nanoelectronics (2024, Volga State University of Technology), Head of laboratory of the Department of Radio Equipment Design and Manufacturing of Volga State University of Technology. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; thin film structures.

Address: Volga State University of Technology, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: romanov.tan2014@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0007-9981-511X>

**Nikita R. Kostik**, Cand. Sci. (2024), Associate Professor of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: renewable energy; feasibility studies for improving the efficiency of hybrid renewable energy systems; and photovoltaics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
<https://orcid.org/0000-0002-5146-8549>

**Sergey A. Tarasov**, Dr Sci. (Eng.) (2016), Head of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solarenergy; physics and optics of semiconductors; light-emitting and photosensitive devices. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: [satarasov@etu.ru](mailto:satarasov@etu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-6321-0019>;

**Matvey E. Ilyin**, Bachelor's degree in Photonics and Optoinformatics (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Master of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. Laboratory researcher of the Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute". The author of 5 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology; photonics; liquid crystals; fullerenes; etc. nanoparticles; interaction of laser radiation with matter; interface, coatings. Address: Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Orlova Roshcha microdistrict, 1, Gatchina 188300, Russia  
E-mail: [ilin\\_matwei@mail.ru](mailto:ilin_matwei@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-4470-2779>

**Natalia V. Kamanina**, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2001), Head of the Department of Photophysics of nanostructured materials and devices of Joint Stock Company "Research and Production Corporation n. a. S. I. Vavilov", Professor (2001) of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University, Lead Researcher of the Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute". The author of 340 scientific publications. Area of expertise: photophysics; nanotechnology; nanoparticles and nanotubes; polymers; liquid crystals; coatings; interaction of radiation with matter. Address: Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Orlova Roshcha microdistrict, 1, Gatchina 188300, Russia  
E-mail: [nvkamanina@mail.ru](mailto:nvkamanina@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

---

## Разработка и апробация методики сбора данных для формирования нормативной базы биомеханических параметров двигательной активности человека

И. А. Сакун<sup>1,2✉</sup>, Д. Б. Попов<sup>1,2</sup>, Е. М. Скребова<sup>2</sup>, М. Д. Самароков<sup>2</sup>,  
Т. В. Тюлькина<sup>2</sup>, В. В. Кравченко<sup>3</sup>, А. С. Мулык<sup>3</sup>, А. В. Губин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

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

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ [sakunia@infran.ru](mailto:sakunia@infran.ru)

### Аннотация

**Введение.** Формирование обоснованных нормативных диапазонов биомеханических параметров движений человека критически важно для диагностики нарушений, планирования оперативного и консервативного лечения в травматологии-ортопедии, контроля реабилитации и разработки реабилитационных устройств. Разработка методики сбора и анализа данных является приоритетной задачей для создания такой базы.

**Цель работы.** Разработка и апробация методики сбора и анализа биомеханических параметров основных двигательных активностей (ходьба, приседания, выпады, наклоны туловища) с использованием современных средств регистрации для создания нормативной базы пространственно-временных, угловых и электромиографических характеристик.

**Материалы и методы.** Использованы: система захвата движения Qualisys, динамометрические платформы Kistler, система беспроводной поверхностной электромиографии (ЭМГ) Delsys Trigno. В исследовании участвовали 8 здоровых добровольцев. Данные собирались в научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения" СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Предобработка данных включала интерполяцию траекторий маркеров, сглаживание ЭМГ-сигналов и удаление выбросов. Нормативные диапазоны рассчитывались на основе средних значений и стандартных отклонений.

**Результаты.** Разработана и апробирована методика сбора биомеханических данных для четырех движений. Получены усредненные значения и предварительные нормативные диапазоны кинематических, кинетических и ЭМГ-параметров, отражающие паттерны движений и мышечной активации у здоровых лиц. Результаты показали, что предложенная методика эффективна для комплексного сбора и анализа биомеханических данных. Использование систем Qualisys и Delsys Trigno обеспечило точную регистрацию параметров движения. Разработанные предварительные нормативные диапазоны демонстрируют потенциал методики для применения в задачах диагностики двигательных отклонений, реабилитации и инженерного проектирования.

**Заключение.** Полученные нормативные данные служат основой для дальнейшего расширения выборки и формирования полноценной базы, необходимой в клинической практике и инженерных разработках в области коррекции движений.

**Ключевые слова:** биомеханика, нормативная база, методика, сбор данных, кинематика, кинетика, электромиография, ходьба, приседания, выпады, наклоны

**Для цитирования:** Разработка и апробация методики сбора данных для формирования нормативной базы биомеханических параметров двигательной активности человека / И. А. Сакун, Д. Б. Попов, Е. М. Скребова, М. Д. Самароков, Т. В. Тюлькина, В. В. Кравченко, А. С. Мулык, А. В. Губин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 104–118.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-104-118

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

**Благодарности.** Работы выполнены с использованием оборудования научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения" СПбГЭТУ "ЛЭТИ".

Статья поступила в редакцию 17.07.2025; принята к публикации после рецензирования 03.03.2026; опубликована онлайн 30.04.2026

## Development and Testing of a Data Collection Methodology for Compiling a Normative Database of Biomechanical Parameters of Human Motor Activity

Ivan A. Sakun<sup>1,2✉</sup>, Dmitry B. Popov<sup>1,2</sup>, Elena M. Skrebova<sup>2</sup>, Mikhail D. Samarokov<sup>2</sup>, Tatyana V. Tyulkina<sup>2</sup>, Vladimir V. Kravchenko<sup>3</sup>, Anzhela S. Mulyk<sup>3</sup>, Alexander V. Gubin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

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

<sup>3</sup> Saint Petersburg State University, St Petersburg, Russia

✉ sakunia@infran.ru

### Abstract

**Introduction.** The determination of normative ranges for the biomechanical parameters of human motor activity is a relevant task for disorder diagnostics, orthopedic treatment planning, rehabilitation monitoring, and development of assistive devices. The creation of such a database requires a validated methodology for data collection and analysis.

**Aim.** To develop and test a methodology for collecting and analyzing the biomechanical parameters of fundamental motor activities (walking, squats, lunges, torso bends) using modern motion capture systems with the purpose of compiling a normative database of spatiotemporal, angular, and electromyographic (EMG) characteristics.

**Materials and methods.** The Qualisys motion capture system (kinematics), Kistler force plates (kinetics), and the Delsys Trigno EMG system (activity of key lower limb muscles) were used. Data was collected from eight healthy volunteers in a laboratory setting following a standard protocol. Preprocessing included marker trajectory interpolation, EMG signal smoothing, and outlier removal (based on IQR). Normative ranges ( $\pm 1$  SD) were calculated based on mean values and standard deviations.

**Results.** A methodology for collecting biomechanical data for four types of motor activity (walking, squats, lunges, torso bends) was developed and tested. The average values and preliminary normative ranges for spatiotemporal, angular, and EMG parameters were obtained, reflecting characteristic movement patterns and muscle activation in healthy individuals. According to the results obtained, the proposed methodology is effective for comprehensive collection and analysis of biomechanical data. The use of Qualisys and Delsys Trigno systems ensured accurate recording of kinematic, kinetic, and EMG movement parameters. The developed preliminary normative ranges indicate the potential of the methodology for diagnosing movement disorders, rehabilitation, and engineering design (exoskeletons, prosthetics).

**Conclusion.** The proposed methodology represents a reliable tool for an objective functional assessment of human motor activity. The obtained preliminary normative data serves as a foundation for further sample expansion and formation of a comprehensive database essential for clinical practice (diagnosis, treatment monitoring, rehabilitation) and engineering applications in movement correction.

**Keywords:** biomechanics, normative database, methodology, data collection, kinematics, kinetics, electromyography, walking, squats, lunges, torso bends

**For citation:** Sakun I. A., Popov D. B., Skrebova E. M., Samarokov M. D., Tyulkina T. V., Kravchenko V. V., Mulyk A. S., Gubin A. V. Development and Testing of a Data Collection Methodology for Compiling a Normative Database of Biomechanical Parameters of Human Motor Activity. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 104–118.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-104-118

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

**Acknowledgements.** The work was performed using the equipment of the research laboratory "Motion Capture and Modelling Systems" of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Submitted 17.07.2025; accepted 03.03.2026; published online 30.04.2026

**Введение.** Современная биомеханика основана на применении точных инструментальных методов, позволяющих получить количественные характеристики движения: кинематические, пространственно-временные, кинетические и с помощью электромиографии (ЭМГ). Исследо-

Разработка и апробация методики сбора данных для формирования нормативной базы биомеханических параметров двигательной активности человека

Development and Testing of a Data Collection Methodology for Compiling a Normative Database of Biomechanical Parameters of Human Motor Activity

вание биомеханики важно для обследования и лечения пациентов травматолого-ортопедического профиля, например при остеоартрозе или различных заболеваниях позвоночника [1, 2]. Данные кинематики и пространственно-временные параметры движения можно получить с помощью метода маркерного видеонализа, силовые (кинетические) и поструральные параметры движения оцениваются с помощью динамометрических платформ. Самым современным методом оценки работы мышц во время движения является беспроводная поверхностная ЭМГ. Все эти методы по отдельности дают лишь частичное понимание биомеханики движения. Чтобы получить полноценный анализ, все вышеперечисленные параметры необходимо оценивать в едином временном интервале, а их регистрация должна выполняться синхронно и сохраняться в единый файл. Такой подход обеспечивают современные системы захвата и моделирования движения, объединяющие систему высокоточных камер с силовыми платформами и системой ЭМГ в одном программном модуле. При этом актуальной задачей остается формирование и наличие обоснованных нормативных диапазонов биомеханических параметров для различных движений человека. Это необходимо для оценки отклонений от физиологической нормы, в том числе в задачах диагностики функциональных нарушений, планировании оперативного лечения и реабилитации в послеоперационном периоде, разработки экзоскелетных и реабилитационных устройств.

Существующие в литературных источниках данные о нормативных базах содержат сведения преимущественно о походках различных возрастных групп. Данные выборки собраны с помощью различных методов и инструментов и чаще всего представляют собой фрагментарные и разрозненные по параметрам массивы. Например, в исследовании с участием 90 человек в возрасте от 2 до 18 лет представлены данные о нормативных кинематических и кинетических параметрах ходьбы на беговой дорожке с различной скоростью [3]. Н. J. Bennett и соавторы [4] описали сбор биомеханических параметров движений тазобедренного и коленного суставов 15 мужчин и 15 женщин. В другом исследовании, основанном на данных 1000

участников, были изучены пространственно-временные параметры движения на разных типах поверхности, что дало возможность учесть индивидуальные особенности ходьбы в разных условиях [5]. Исследования биомеханики при различных физиологических процессах позволяют выявлять патологические болевые паттерны, что способствует более точной диагностике и эффективному лечению заболеваний опорно-двигательного аппарата, например при болях в поясничном отделе позвоночника [6, 7]. В работе [8], посвященной анализу походки в условиях виртуальной реальности, были получены нормативные данные 246 здоровых взрослых при ходьбе на беговой дорожке. В некоторых исследованиях применялись комплексные подходы, такие как комбинированное использование маркерных систем с датчиками силы и ЭМГ и несколько условий ходьбы [9, 10]. Однако эти данные являются закрытыми.

Отдельно стоит отметить базы нормативных параметров для разных возрастных групп, большая часть которых относится к детям. Известно о нормативной выборке ЭМГ мышц нижних конечностей при исследовании походки у 100 детей [11]. С использованием электронной беговой дорожки с участием 438 детей в возрасте от 1 до 10 лет собраны пространственно-временные параметры ходьбы [12]. Также публиковались материалы исследования, посвященного формированию нормативных показателей по высоте при выполнении прыжков на 1 ноге и параметров шага при ходьбе с нормальной скоростью, полученные от 360 детей 7–12 лет [13]. Для оценки угла наклона стопы относительно пола сформирован нормативный набор кинематических данных, полученный с помощью маркерного видеонализа с участием 120 здоровых детей при выполнении нормальной ходьбы и у 11 детей с патологией (ходьба на носочках) [14]. С помощью инерциальной системы захвата собраны пространственно-временные параметры походки 175 детей и молодых людей [15]. Существующие литературные данные включают также исследования, посвященные специфическим задачам, например ходьбе по лестнице [16, 17] и движениям верхних конечностей [18]. Тем не менее существующие базы данных ограничены

по набору движений, что делает необходимым расширение и уточнение этих данных. Нет информации о существующих нормативных базах параметров таких двигательных задач, как прыжки, приседания, наклоны, выпады на колено и прочих спортивных упражнений.

В последние годы развивается технология безмаркерного захвата движений, которая требует постоянной валидации с методом маркерного видеоанализа, являющегося наиболее точным среди имеющихся. Поэтому потребность в стандартизированных наборах биомеханических параметров и спектр двигательных задач не только не уменьшаются, но и стремительно растут вместе с расширением области применения безмаркерных технологий [19]. Разрозненность подходов и фрагментарность существующих нормативных выборок затрудняют получение референсных данных о двигательной активности в полном объеме и их применение в прикладных задачах.

Текущее исследование направлено на разработку и апробацию комплексной методики формирования нормативной базы биомеханических параметров, отличительной чертой которой является использование маркерной модели всего тела, электромиографии, динамометрических платформ, а также охватывает разнообразные двигательные задачи (наклоны, приседания, выпады и ходьбу с различной скоростью). Отсутствие аналогичных комплексных разработок в российской научной практике подчеркивает актуальность и новизну предлагаемого подхода.

**Материалы и методы.** Настоящее исследование включало несколько последовательных этапов: разработку протокола синхронной регистрации кинематических, кинетических и электромиографических данных, проведение экспериментального измерения, обработку полученных сигналов и формирование предварительных нормативных диапазонов.

В исследовании приняли участие восемь здоровых добровольцев мужского пола ( $n = 8$ ) без видимых нарушений опорно-двигательного аппарата и неврологических заболеваний. Средний возраст составил  $24.71 \pm 5.38$  лет, средний рост –  $179 \pm 6.06$  см. Все участники были ознакомлены с условиями эксперимента и дали информированное согласие.

Сбор кинематических данных выполнялся в научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения" СПбГЭТУ "ЛЭТИ" с использованием метрологически поверенной системы оптического захвата Qualisys (Швеция). Частота дискретизации составляла 150 Гц. На теле участников закреплялись отражающие маркеры согласно модели IOR Full Body Marker Set [20], ориентированной на анализ движений туловища и конечностей в трех анатомических плоскостях.

Кинетические параметры регистрировались двумя динамометрическими платформами Kistler (Швейцария), встроенными в пол и синхронизированными с системой Qualisys через программное обеспечение Qualisys Track Manager (QTM). Частота опроса платформ – 1000 Гц. Фиксировались векторы силы реакции опоры, на основе которых рассчитывались суставные моменты и пространственно-временные характеристики ходьбы (фазы опоры и переноса).

Мышечная активность измерялась беспроводной 16-канальной системой поверхностной электромиографии Delsys Trigno (США) с частотой дискретизации 2148 Гц. Электроды размещались в соответствии с рекомендациями SENIAM [21] на трех мышцах нижних конечностей: передней большеберцовой (*m. tibialis anterior*), медиальной головке икроножной (*m. gastrocnemius medialis*) и прямой мышце бедра (*m. rectus femoris*). Регистрация проводилась билатерально.

В работе были выбраны четыре функционально значимых движения:

- ходьба по ровной поверхности с четырьмя скоростями (1.5; 3.0; 4.5 и 6.0 км/ч);
- приседания с полной амплитудой до максимального сгибания коленных и тазобедренных суставов;
- выпады вперед на одну ногу;
- наклоны туловища вперед.

Выбор данных упражнений обусловлен способностью этих движений задействовать основные мышечные группы и суставы, что дает комплексную информацию для задач реабилитации, спорта и инженерного проектирования. Приседания активируют квадрицепсы, бицепсы бедра, ягодичные мышцы и разгибатели спины; наклоны туловища вовлекают мышцы спины и кора, позволяя оценить биомехани-



Рис. 1. Данные, обработанные в Qualisys Track Manager  
Fig. 1. Data processed in Qualisys Track Manager

ку поясничного отдела и тазобедренного сустава; выпады направлены на активацию квадрицепсов, ягодичных мышц и мышц бедра, важны для оценки стабильности нижних конечностей. Все задания выполнялись в спортивной обуви после краткого инструктажа и пробного повторения, в стандартизированной последовательности. Для каждого участника создавался индивидуальный каталог, включавший 6 динамических и одну статическую запись.

Первичная фильтрация и интерполяция траекторий маркеров, а также сглаживание ЭМГ-сигналов проводились в среде QTM. Пример обработанных данных представлен на рис. 1.

Далее данные экспортировались в программу Visual3D, где строилась биомеханическая модель испытуемого и вычислялись угловые, линейные и энергетические параметры движений. Для каждого участка формировался отчет.

Для обеспечения сопоставимости данных между испытуемыми и мышцами проводилась амплитудная нормализация: значения огибающей каждого канала ЭМГ делились на максимальное значение, зарегистрированное при выполнении данного двигательного задания (для ходьбы – на максимум в цикле шага, для приседаний, выпадов и наклонов – на пик в цикле действия). Для унификации анализа все временные ряды (углы, моменты, ЭМГ) приводились к единой временной шкале. При ходьбе использовалась нормировка на цикл шага, определяемый интервалом между двумя последователь-

ными касаниями пятки одной ноги (0–100 %). Для приседаний, выпадов и наклонов применялась нормировка на цикл действия – от момента начала движения из исходного вертикального положения (0 %) до возврата в него (100 %).

Заключительный этап исследования посвящен формированию нормативной базы. Для этого данные экспортировались в формат, пригодный для анализа с помощью пользовательских скриптов, реализованных в среде Python. Алгоритмы обработки включали этапы нормализации, усреднения данных по участникам и вычисления диапазонов нормативных значений. Для построения нормативной базы рассчитывались средние значения и стандартные отклонения по каждому из биомеханических параметров, а нормативный интервал определялся как диапазон, ограниченный границами стандартного отклонения от среднего значения. Алгоритм, реализованный в пользовательском скрипте, предусматривал автоматическую обработку большого массива данных, с выделением ключевых пространственно-временных, угловых, кинетических и электромиографических параметров. В качестве исходных параметров нормативной базы рассматривались следующие группы характеристик: кинематические (суставные углы, траектории движения сегментов, амплитуды движений), кинетические (силы реакции опоры, моменты силы в суставах, мощность), а также ЭМГ.

**Результаты.** Получены экспериментальные данные, характеризующие биомеханику движений нижних и верхних конечностей у 8 здоровых добровольцев. Проведен анализ угловых параметров тазобедренного, коленного, голеностопного, плечевого и локтевого суставов, а

также положения грудного отдела позвоночника относительно лабораторных координат в трех плоскостях движения. В сагиттальной плоскости рассчитаны суставные моменты и мощности для указанных суставов. Полученные значения были усреднены и использованы

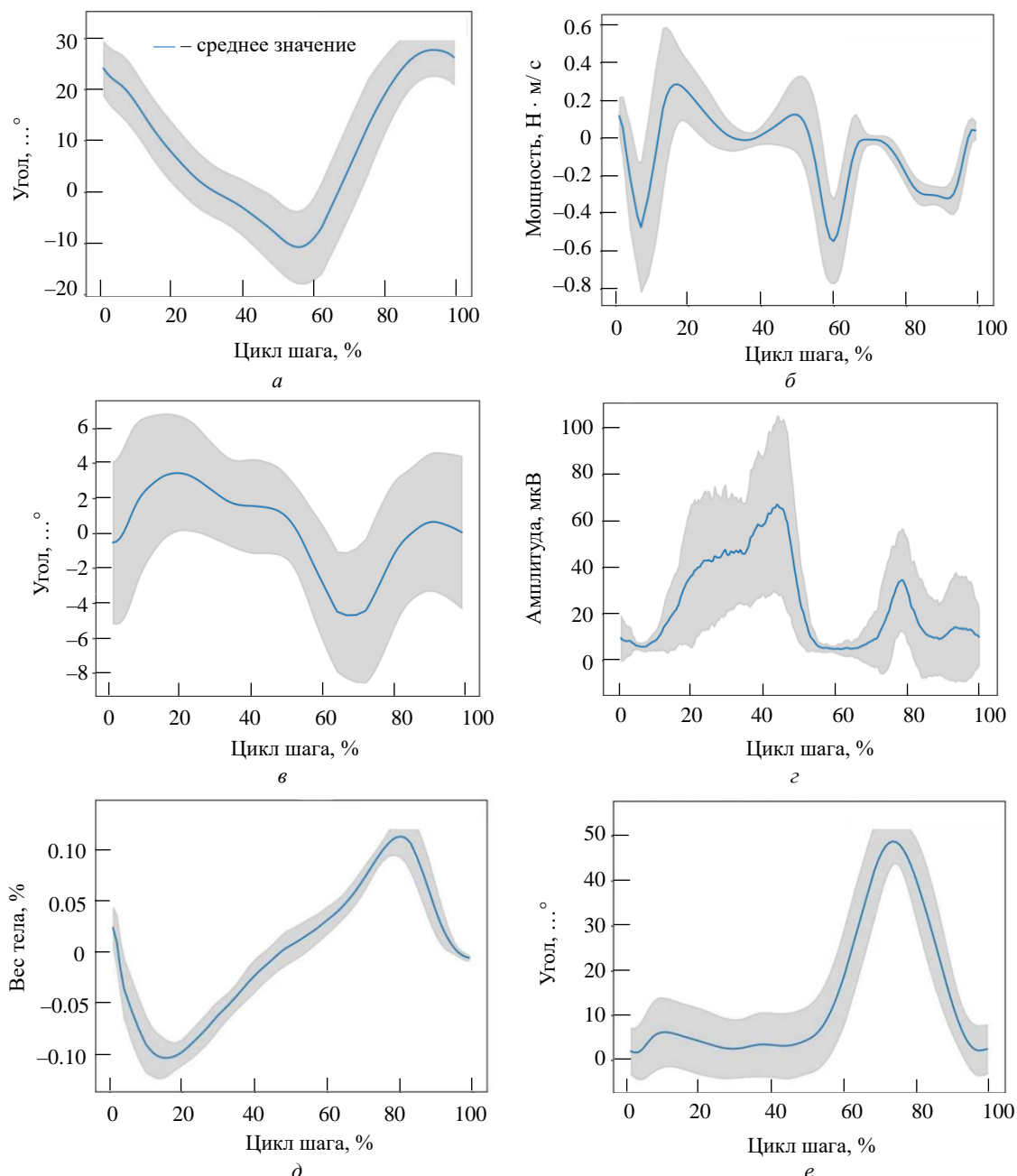


Рис. 2. Нормативные диапазоны значений биомеханических параметров при ходьбе со скоростью 3 км/ч: *a* – угол сгибания правого бедра в сагиттальной плоскости; *б* – генерируемая в правом колене мощность в сагиттальной плоскости; *в* – угол сгибания правого бедра во фронтальной плоскости; *г* – ЭМГ левой медиальной головки икроножной мышцы; *д* – сила реакции опоры во фронтальной плоскости; *е* – угол сгибания правого колена в сагиттальной плоскости

Fig. 2. Normative ranges of biomechanical parameters values during walking at a speed of 3 km/h: *a* – angle of flexion of the right hip in the sagittal plane; *б* – power generated in the right knee in the sagittal plane; *в* – angle of flexion of the right hip in the frontal plane; *г* – EMG of the left medial head of the calf muscle; *д* – reaction force in the frontal plane; *е* – angle of flexion of the right knee in the sagittal plane

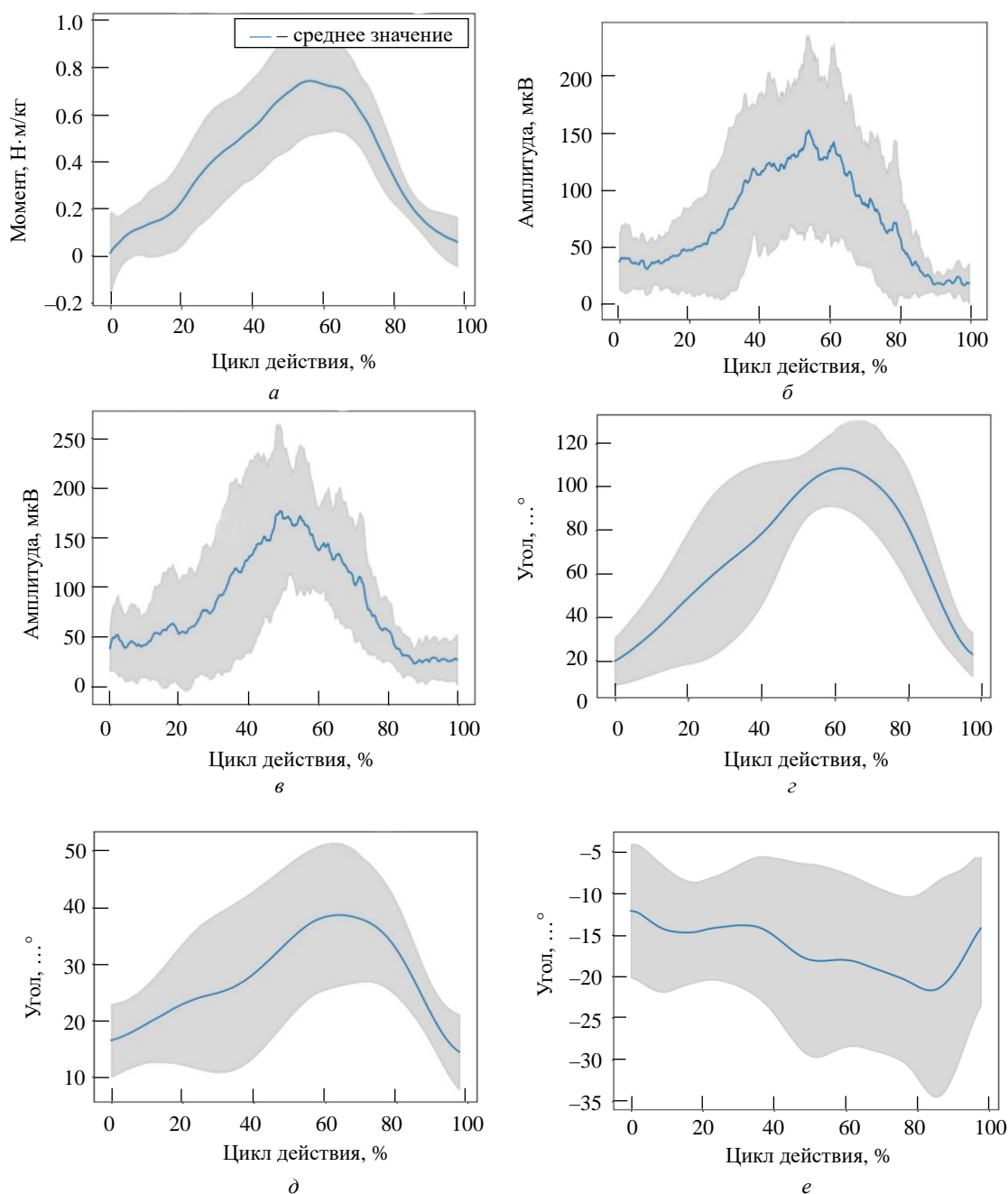


Рис. 3. Нормативные диапазоны значений биомеханических параметров при приседаниях: *a* – момент силы в левом бедре в сагиттальной плоскости; *б* – ЭМГ левой передней большеберцовой мышцы; *в* – ЭМГ правой передней большеберцовой мышцы; *г* – угол сгибания правого плеча в сагиттальной плоскости; *д* – угол наклона туловища в сагиттальной плоскости; *е* – угол сгибания правого плеча во фронтальной плоскости

Fig. 3. Normative ranges of biomechanical parameters during squats: *a* – moment of force in the left hip in the sagittal plane; *б* – EMG of the left anterior tibial muscle; *в* – EMG of the right anterior tibial muscle; *г* – angle of flexion of the right shoulder in the sagittal plane; *д* – angle of inclination of the trunk in the sagittal plane; *е* – angle of flexion of the right shoulder in the frontal plane

для построения нормативных диапазонов биомеханических параметров. Примеры графиков нормативных диапазонов значений биомеханических параметров для ходьбы, приседаний, выпадов на ногу и наклонов туловища вперед представлены на рис. 2–5 соответственно.

На рис. 6 и 7 представлены нормативные диапазоны ( $M \pm SD$ ) углов сгибания в коленном и голеностопном суставах, полученные для четырех различных скоростей ходьбы. Визуальный анализ графиков позволяет проследить характерные изменения амплитуды и времен-

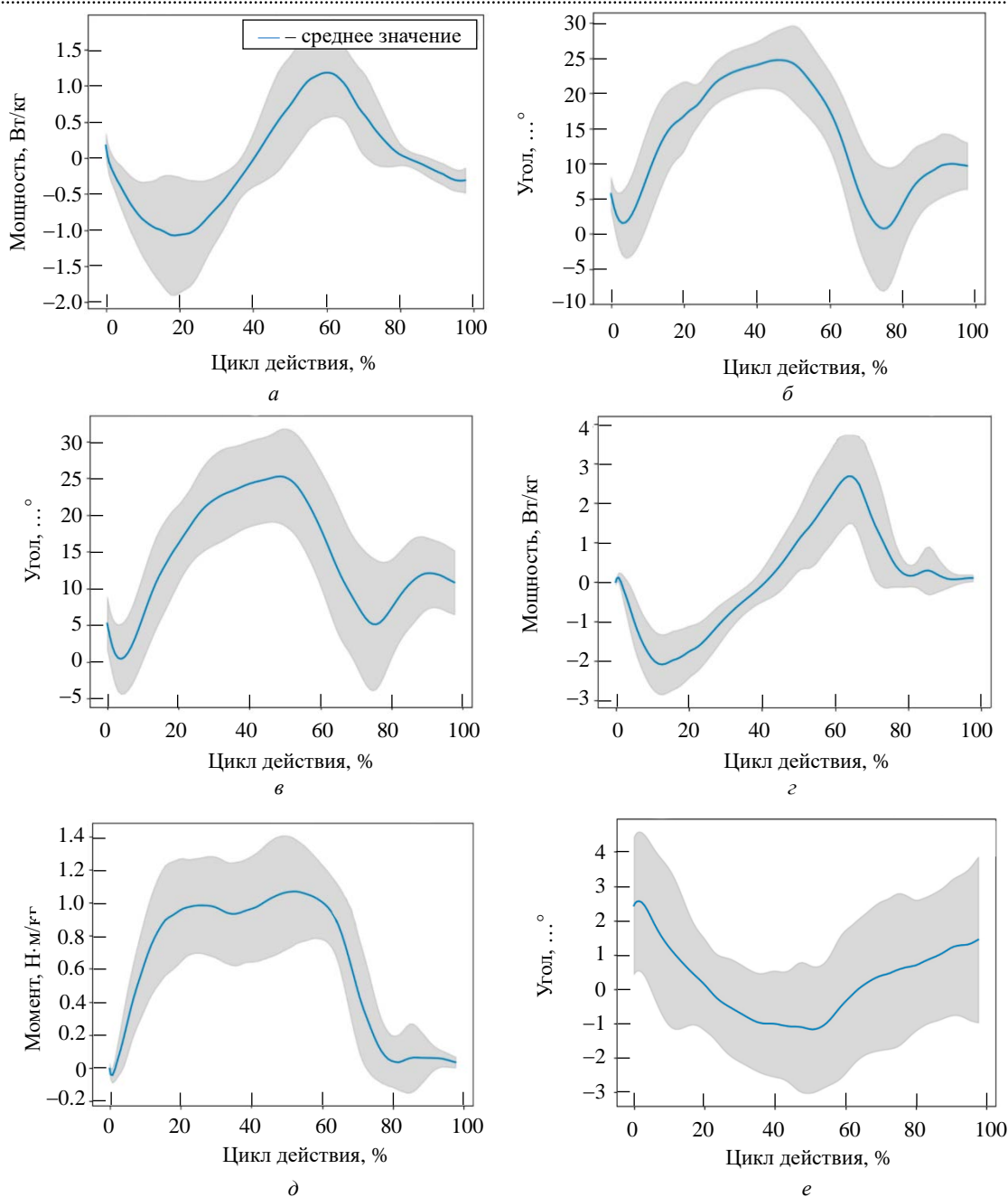


Рис. 4. Нормативные диапазоны значений биомеханических параметров при выпадах на ногу: а – генерируемая в левом бедре мощность в сагиттальной плоскости; б – угол сгибания правого голеностопа в сагиттальной плоскости; в – угол сгибания левого голеностопа в сагиттальной плоскости; г – генерируемая в левом колене мощность в сагиттальной плоскости; д – момент силы в левом колене в сагиттальной плоскости; е – угол вращения туловища в горизонтальной плоскости

Fig. 4. Normative ranges of biomechanical parameters during single-leg lunges: а – power generated in the left hip in the sagittal plane; б – angle of right ankle flexion in the sagittal plane; в – angle of left ankle flexion in the sagittal plane; г – power generated in the left knee in the sagittal plane; д – moment of force in the left knee in the sagittal plane; е – angle of trunk rotation in the horizontal plane

ной структуры суставных движений по мере увеличения темпа ходьбы.

**Обсуждение.** На основе экспериментальных данных, полученных с применением маркерной системы Qualisys, платформ

Kistler и ЭМГ системы Delsys Trigno, разработана методика сбора и формирования первичной нормативной базы биомеханических параметров для четырех базовых двигательных активностей: ходьба при разных скоро-

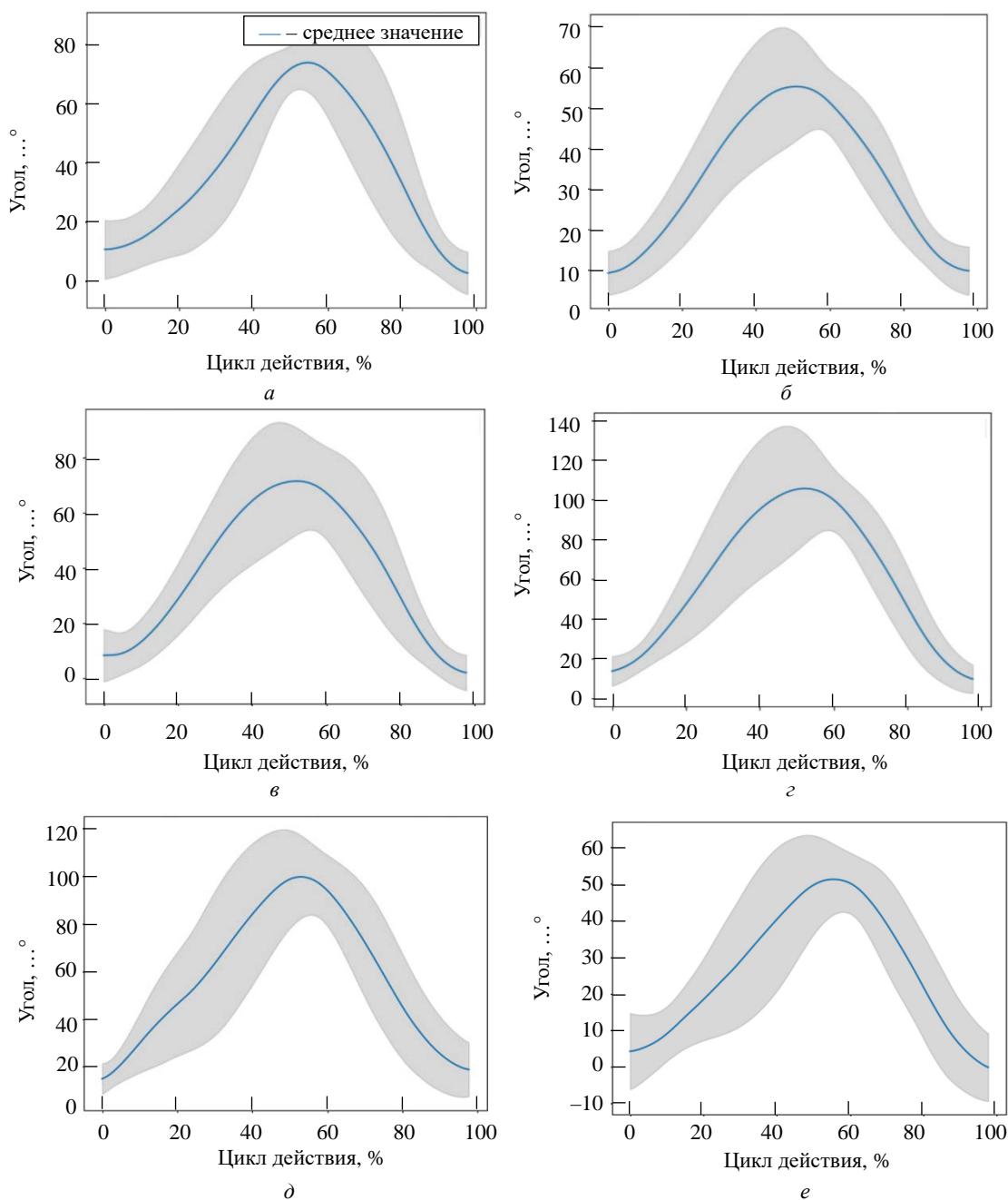


Рис. 5. Нормативные диапазоны значений биомеханических параметров при наклонах туловища вперед: *a* – угол сгибания правого бедра в сагиттальной плоскости; *б* – угол наклона левой стороны таза в сагиттальной плоскости; *в* – угол сгибания левого бедра в сагиттальной плоскости; *г* – угол наклона левой стороны туловища относительно лабораторной системы координат в сагиттальной плоскости; *д* – угол сгибания правого плеча в сагиттальной плоскости; *е* – угол наклона туловища в сагиттальной плоскости

Fig. 5. Normative ranges of biomechanical parameters when the trunk is tilted forward: *a* – the angle of the right thigh flexion in the sagittal plane; *б* – the angle of the left side of the pelvis tilt in the sagittal plane; *в* – the angle of the left thigh flexion in the sagittal plane; *г* – the angle of the left side of the trunk tilt relative to the laboratory coordinate system in the sagittal plane; *д* – the angle of the right shoulder flexion in the sagittal plane; *е* – the angle of the trunk tilt in the sagittal plane

стях, приседания, выпады и наклоны. Методика продемонстрировала свою эффективность при оценке двигательной активности здоровых людей.

Результаты показали, что разработанный протокол позволяет получать воспроизводимые биомеханические параметры, характеризующие выполнение типичных двигательных заданий

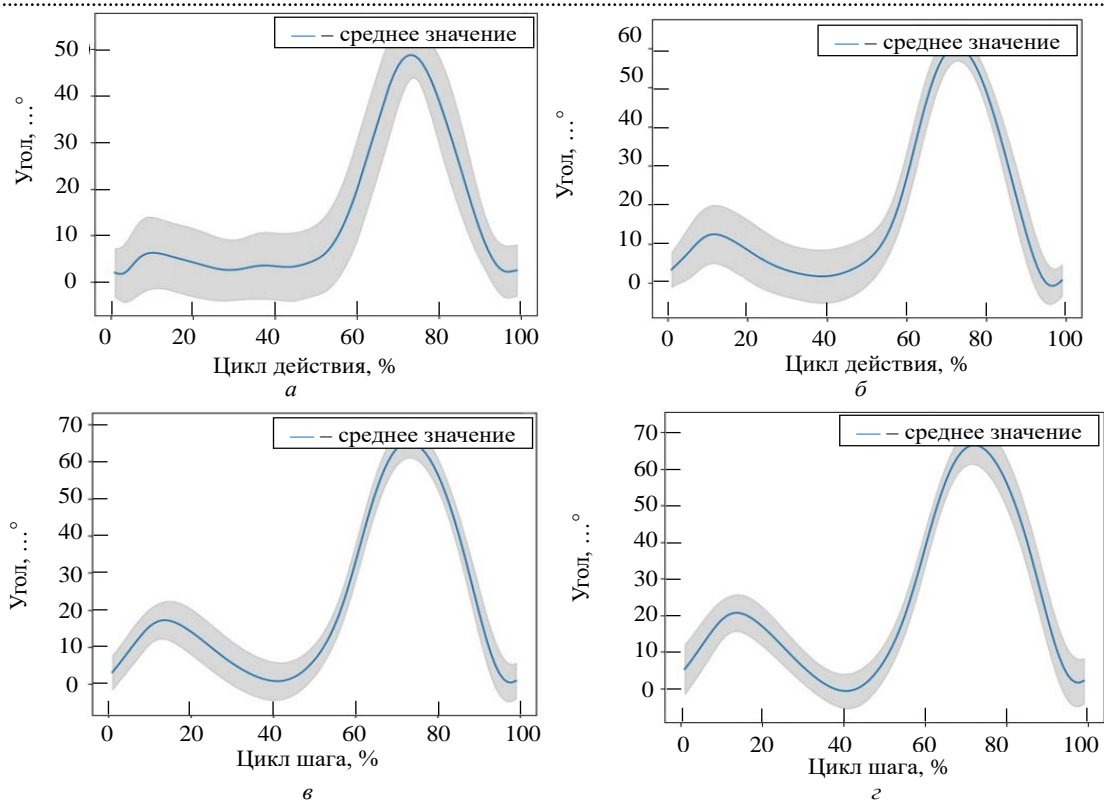


Рис. 6. Нормативные диапазоны угла сгибания правого колена в сагиттальной плоскости при разной скорости походки [км/ч]: а – 1.5; б – 3; в – 4.5; г – 6

Fig. 6. Normative ranges of the right knee flexion angle in the sagittal plane at different walking speeds [km/h]: а – 1.5; б – 3; в – 4.5; г – 6

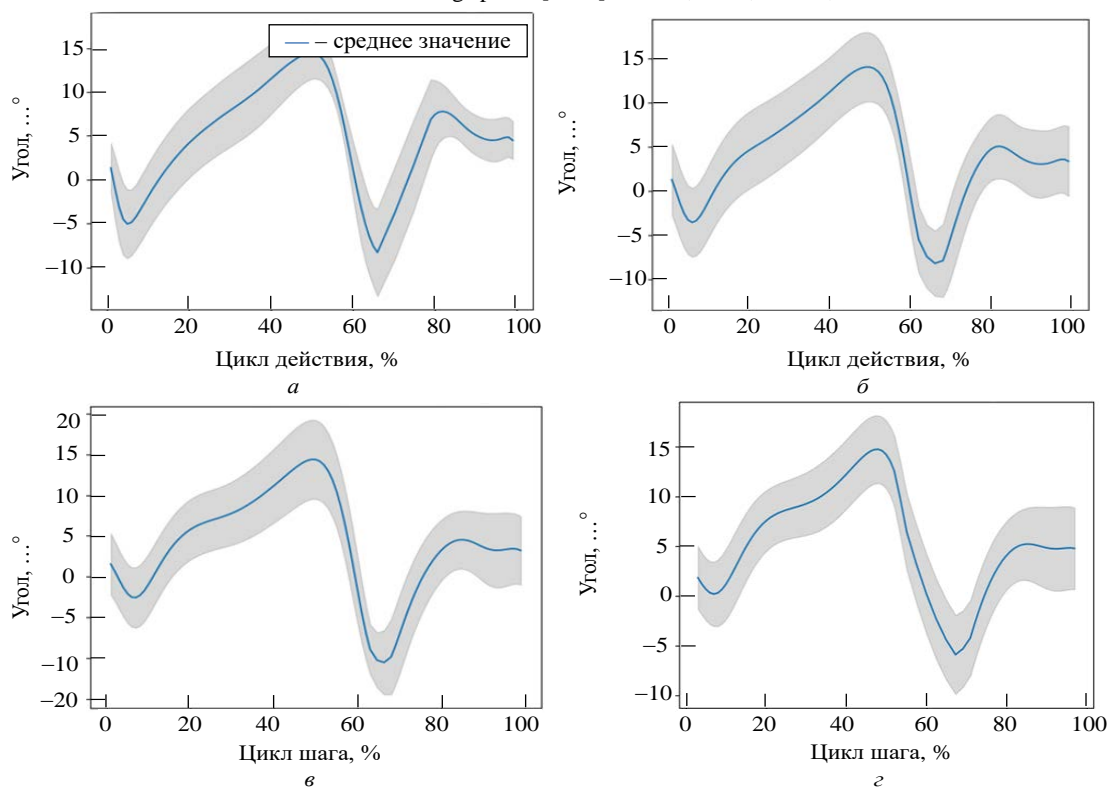


Рис. 7. Нормативные диапазоны угла сгибания правого голеностопа в сагиттальной плоскости при разной скорости походки [км/ч]: а – 1.5; б – 3; в – 4.5; г – 6

Fig. 7. Normative ranges of the angle of flexion of the right ankle in the sagittal plane at different walking speeds [km/h]: а – 1.5; б – 3; в – 4.5; г – 6

(в частности, ходьбы в стандартных условиях). На основе этих данных были определены ориентировочные диапазоны ключевых биомеханических параметров, отражающих особенности физиологически нормального двигательного стереотипа. Полученные профили биомеханических параметров при ходьбе с разными скоростями совпадают с результатами, опубликованными в зарубежных исследованиях [9, 17]. Следует подчеркнуть, что в рамках данной статьи речь идет не о формировании окончательной нормативной базы, а об апробации подхода к ее построению. Полученные результаты носят пилотный характер и не претендуют на статистическую репрезентативность в силу ограниченного объема выборки. Тем не менее разработанная методика закладывает основу

для дальнейшего масштабного сбора данных, направленного на формирование полноценных нормативных справочников, пригодных для использования в клинической практике, реабилитации, спортивной медицине и инженерных приложениях – таких как проектирование ортопедических изделий и систем протезирования.

**Заключение.** Предложенная методика сбора и анализа биомеханической информации представляет собой перспективный инструмент для объективной функциональной оценки двигательной активности человека и может быть адаптирована для широкого спектра практических задач. Такой подход позволяет сформировать контрольно-отправные точки для исследования, диагностики и лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата.

#### Авторский вклад

**Сакун Иван Антонович** – сбор данных; разработка и реализация алгоритма; написание статьи.  
**Попов Дмитрий Борисович** – обработка данных; разработка и реализация алгоритма; написание статьи.  
**Скребова Елена Михайловна** – обработка и анализ данных; реализация алгоритма; написание статьи.  
**Самароков Михаил Дмитриевич** – сбор данных; обработка данных; реализация алгоритма.  
**Тюлькина Татьяна Владимировна** – сбор данных; обработка данных.  
**Кравченко Владимир Владимирович** – редактирование статьи.  
**Мулык Анжела Сергеевна** – редактирование статьи.  
**Губин Александр Вадимович** – редактирование статьи.

#### Author's contribution

**Ivan A. Sakun**, data collection, processing and analysis; development and implementation of the algorithm; writing the article.  
**Dmitry B. Popov**, data processing; development and implementation of the algorithm; writing the article.  
**Elena M. Skrebova**, data processing and analysis; implementation of the algorithm; writing the article.  
**Mikhail D. Samarokov**, data collection; data processing; implementation of the algorithm.  
**Tatyana V. Tyulkina**, data collection; data processing.  
**Vladimir V. Kravchenko**, editing the article.  
**Angela S. Mulyk**, editing the article.  
**Alexander V. Gubin**, editing the article.

#### Список литературы

1. Osteoarthritis year in review 2024: Biomechanics / A. Mündermann, C. Nüesch, H. Ewald, I. Jonkers // *Osteoarthritis Cartilage*. 2024. Vol. 32, № 12. P. 1530–1541. doi: 10.1016/j.joca.2024.09.011
2. Когельников А. О., Рябых С. О., Бурцев А. В. "Hip-spine" синдром – взгляд на проблему с точки зрения биомеханики // *Гений ортопедии*. 2019. Т. 25, № 4. С. 541–549. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-541-549
3. How normal is normal: Consequences of stride to stride variability, treadmill walking and age when using normative paediatric gait data / L. M. Oudenhoven, A. T. C. Booth, A. I. Buizer, J. Harlaar, M. M. van der Krogt // *Gait & Posture*. 2019. Vol. 70. P. 289–297. doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.03.011
4. Bennett H. J., Fleenor K., Weinhandl J. T. A normative database of hip and knee joint biomechanics during dynamic tasks using anatomical regression prediction methods // *J. of Biomechanics*. 2018. Vol. 81. P. 122–131. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.10.003
5. Adhaye A. M., Jolhe D. A. GAIT measurement methods: systematic review and comparative studies // *J. of Mechanics in Medicine and Biology*. 2024. Vol. 24, № 01. Art. № 2330002. doi: 10.1142/S0219519423300028
6. Not all movements are equal: Differences in the variability of trunk motor behavior between people with and without low back pain – A systematic review with descriptive synthesis / F. Abu Bakar, J. B. Staal, R. van Cingel, H. Saito, R. Ostelo, J. H. van Dieën // *PLoS One*. 2023. Vol. 18, № 9. Art. № e0286895.

doi: 10.1371/journal.pone.0286895

7. Walking, Cycling, and Swimming for Nonspecific Low Back Pain: A Systematic Review with Meta-analysis / N. C. Pocovi, T. F. de Campos, C. W. Christine Lin, D. Merom, A. Tiedemann, M. J. Hancock // *J. of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2022. Vol. 52, № 2. P. 85–99.

doi: 10.2519/jospt.2022.10612

8. Normative 3D gait data of healthy adults walking at three different speeds on an instrumented treadmill in virtual reality / R. Senden, R. Marcellis, P. Willems, M. Witlox, K. Meijer // *Data in Brief*. 2024. Vol. 53. Art. № 110230.

doi: 10.1016/j.dib.2024.110230

9. A multiple-task gait analysis approach: kinematic, kinetic and EMG reference data for healthy young and adult subjects / G. Bovi, M. Rabuffetti, P. Mazzoleni, M. Ferrarin // *Gait & Posture*. 2011. Vol. 33, № 1. P. 6–13.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.08.009

10. Synchronised Video, Motion Capture and Force Plate Dataset for Validating Markerless Human Movement Analysis / M. Evans, L. Needham, L. Wade, M. Parsons, S. Colyer, P. McGuigan, J. Bilzon, D. Cosker // *Scientific Data*. 2024. Vol. 11. Art. № 1300.

doi: 10.1038/s41597-024-04077-3

11. Normative EMG activation patterns of school-age children during gait / V. Agostini, A. Nascimbeni, A. Gaffuri, P. Imazio, M. G. Benedetti, M. Knaflitz // *Gait & Posture*. 2010. Vol. 32, № 3. P. 285–289.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.06.024

12. Dusing S. C., Thorpe D. E. A normative sample of temporal and spatial gait parameters in children using the GAITRite® electronic walkway // *Gait & Posture*. 2007. Vol. 25, № 1. P. 135c139.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.06.003

13. A normative sample of gait and hopping on one leg parameters in children 7–12 years of age / I. Holm, A. T. Tveter, P. M. Fredriksen, N. Vøllestad // *Gait & Posture*. 2009. Vol. 29, № 2. P. 317–321.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2008.09.016

14. The utility of normative foot floor angle data in assessing toe-walking / A. H. Vette, J. M. Watt, J. Lewicke, B. Watkins, L. M. Burkholder, J. Andersen, G. S. Jhangri, S. Dulai // *The Foot*. 2018. Vol. 37. P. 65–70.

doi: 10.1016/j.foot.2018.07.003

15. Normative database of spatiotemporal gait parameters using inertial sensors in typically developing children and young adults / S. Voss, J. Joyce, A. Biskis, M. Parulekar, N. Armijo, C. Zampieri, R. Tracy, A. S. Palmer, M. Fefferman, B. Ouyang, Y. Liu, E. Berry-Kravis, J. A. O'Keefe // *Gait & Posture*. 2020. Vol. 80. P. 206–213.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.05.010

16. Development of stratified normative data and reference equations for the timed up and down stairs test for healthy children 6–14 years of age / T. del Corral, J. Vivas-Mateos, M. Castillo-Pelaz, S. Aguilar-Zafra, I. López-de-Uralde-Villanueva // *Physiotherapy*. 2021. Vol. 112. P. 31–40.

doi: 10.1016/j.physio.2021.03.002

17. Human kinematic, kinetic and EMG data during different walking and stair ascending and descending tasks / T. Lencioni, I. Carpinella, M. Rabuffetti, A. Marzegan, M. Ferrarin // *Scientific Data*. 2019. Vol. 6. Art. № 309.

doi: 10.1038/s41597-019-0323-z

18. Upper Extremity Performance Test for the Elderly (TEMPA): Normative Data for Young Adults / B. Nedelec, K. Dion, J. A. Correa, J. Desrosiers // *J. of Hand Therapy*. 2011. Vol. 24, № 1. P. 31–43.

doi: 10.1016/j.jht.2010.09.001

19. Validation of automated countermovement vertical jump analysis: markerless pose estimation vs. 3D marker-based motion capture system / J. Aleksic, D. Kanevsky, D. Mesaros, O. M. Knezevic, D. Cabarkapa, B. Bozovic, D. M. Mirkov // *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 20. Art. № 6624.

doi: 10.3390/s24206624

20. A new anatomically based protocol for gait analysis in children / A. Leardini, Z. Sawacha, G. Paolini, S. Ingrassio, R. Nativo, M. G. Benedetti // *Gait & Posture*. 2007. Vol. 26. P. 560–571.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.12.018

21. Stegeman D. F., Hermens H. J. Standards for surface electromyography: the European project "Surface EMG for non-invasive assessment of muscles (SENIAM)". 2007. P. 108–112. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228486725\\_Standards\\_for\\_surface\\_electromyography\\_The\\_European\\_project\\_Surface\\_EMG\\_for\\_non-invasive\\_assessment\\_of\\_muscles\\_SENIAM#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/228486725_Standards_for_surface_electromyography_The_European_project_Surface_EMG_for_non-invasive_assessment_of_muscles_SENIAM#fullTextFileContent) (дата обращения: 18.03.2025).

## Информация об авторах

**Сақун Иван Антонович** – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), младший научный сотрудник лаборатории физиологии движения Института физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук (Санкт-Петербург); младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения", аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 16 научных публикаций. Сфера научных интересов – биомеханика; биомеханика физических упражнений; системы захвата движений; персональная навигация; обработка данных. Адрес: Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, наб. Макарова, д. 6, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: sakunia@infran.ru

<https://orcid.org/0009-0003-7810-8396>

**Попов Дмитрий Борисович** – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), младший научный сотрудник лаборатории физиологии зрения Института физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук (Санкт-

Санкт-Петербург); младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения", аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 9 научных публикаций. Сфера научных интересов – биомеханика; лечебная физическая культура; виртуальная реальность; дополненная реальность; Unreal Engine; геймификация; персональная навигация; обработка данных.

Адрес: Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, наб. Макарова, д. 6, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: db.popov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4270-2349>

**Скребова Елена Михайловна** – специалист по направлению "Инженерное дело в медико-биологической практике" (2015, Национальный минерально-сырьевой университет "Горный"), начальник научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения" на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 8 научных публикаций. Сфера научных интересов – биомеханика; анализ движений; системы захвата движения; машинное обучение; персональная навигация.

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

E-mail: emskrebova@etu.ru

**Самароков Михаил Дмитриевич** – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер 3-й категории бюро расчета надежности АО «НПП "Радар ммс"». Автор 8 научных публикаций. Сфера научных интересов – биомеханика; биомеханика физических упражнений; системы захвата движений; персональная навигация; обработка данных.

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

E-mail: michael.sam120900@gmail.com

**Тюлькина Татьяна Владимировна** – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирантка кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер-конструктор 2-й категории ООО "Альянс ПРОФИТ". Автор 8 научных публикаций. Сфера научных интересов – моделирование изделий; биомеханика, системы захвата движений; обработка данных

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

E-mail: tatyanyatul@mail.ru

**Кравченко Владимир Владимирович** – врач травматолог-ортопед (2025, Санкт-Петербургский государственный университет) Клиники высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета. Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – травматология; ортопедия; коленный и тазобедренный сустав.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: dr.vkravchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-4104-8405>

**Мулык Анжела Сергеевна** – врач травматолог-ортопед (2020, Санкт-Петербургский государственный университет) Клиники высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета. Автор 5 научных публикаций. Сфера научных интересов – травматология; ортопедия; опорно-двигательный аппарат.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: md.amulyk@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-5041-1915>

**Губин Александр Вадимович** – доктор медицинских наук (2009), профессор (2010), заведующий кафедрой травматологии и ортопедии Санкт-Петербургского государственного университета. Первый заместитель главного врача, врач травматолог-ортопед Клиники высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета. Автор 198 научных работ. Сфера научных интересов – травматология; ортопедия; позвоночник; пороки развития и деформации позвоночника у детей и взрослых.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: shugul9@gubin.spb.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3234-8936>

## References

1. Mündermann A., Nüesch C., Ewald H., Jonkers I. Osteoarthritis Year in Review 2024: Biomechanics. Osteoarthritis Cartilage. 2024, vol. 32, no. 12, pp. 1530–1541. doi: 10.1016/j.joca.2024.09.011
2. Kotelnikov A. O., Ryabykh S. O., Burtsev A. V. Hip-Spine Syndrome: the Problem from the Biomechanical Point of View. *Genij Ortopedii*. 2019, vol. 25, no. 4, pp. 541–549. (In Russ.) doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-541-549
3. Oudenhoven L. M., Booth A. T. C., Buizer A. I., Harlaar J., van der Krogt M. M. How Normal Is Normal: Consequences of Stride to Stride Variability, Treadmill Walking and Age When Using Normative Paediatric Gait Data. *Gait & Posture*. 2019, vol. 70, pp. 289–297. doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.03.011
4. Bennett H. J., Fleenor K., Weinhandl J. T. A Normative Database of Hip and Knee Joint Biomechanics During Dynamic Tasks Using Anatomical Regression Prediction Methods. *J. of Biomechanics*. 2018, vol. 81, pp. 122–131. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.10.003
5. Adhaya A. M., Jolhe D. A. GAIT Measurement Methods: Systematic Review and Comparative Studies. *J. of Mechanics in Medicine and Biology*. 2024, vol. 24, no. 1, art. no. 2330002. doi: 10.1142/S0219519423300028
6. Abu Bakar F., Staal J. B., van Cingel R., Saito H., Ostelo R., van Dieën J. H. Not All Movements are Equal: Differences in the Variability of Trunk Motor Behavior Between People with and Without Low Back Pain – A Systematic Review with Descriptive Synthesis. *PLoS One*. 2023, vol. 18, no. 9, art. no. e0286895. doi: 10.1371/journal.pone.0286895
7. Pocovi N. C., de Campos T. F., Christine Lin C. W., Merom D., Tiedemann A., Hancock M. J. Walking, Cycling, and Swimming for Nonspecific Low Back Pain: A Systematic Review with Meta-analysis. *J. of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2022, vol. 52, no. 2, pp. 85–99. doi: 10.2519/jospt.2022.10612
8. Senden R., Marcellis R., Willems P., Witlox M., Meijer K. Normative 3D Gait Data of Healthy Adults Walking at Three Different Speeds on an Instrumented Treadmill in Virtual Reality. *Data in Brief*. 2024, vol. 53, art. no. 110230. doi: 10.1016/j.dib.2024.110230
9. Bovi G., Rabuffetti M., Mazzoleni P., Ferrarin M. A Multiple-Task Gait Analysis Approach: Kinematic, Kinetic and EMG Reference Data for Healthy Young and Adult Subjects. *Gait & Posture*. 2011, vol. 33, no. 1, pp. 6–13. doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.08.009
10. Evans M., Needham L., Wade L., Parsons M., Colyer S., McGuigan P., Bilzon J., Cosker D. Synchronised Video, Motion Capture and Force Plate Dataset for Validating Markerless Human Movement Analysis. *Scientific Data*. 2024, vol. 11, art. no. 1300. doi: 10.1038/s41597-024-04077-3
11. Agostini V., Nascimbeni A., Gaffuri A., Imazio P., Benedetti M. G., Knaflitz M. Normative EMG Activation Patterns of School-Age Children During Gait. *Gait & Posture*. 2010, vol. 32, no. 3, pp. 285–289. doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.06.024
12. Dusing S. C., Thorpe D. E. A Normative Sample of Temporal and Spatial Gait Parameters in Children Using the GAITRite® Electronic Walkway. *Gait & Posture*. 2007, vol. 25, no. 1, pp. 135–139. doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.06.003
13. Holm I., Tveter A. T., Fredriksen P. M., Vøllestad N. A Normative Sample of Gait and Hopping on One Leg Parameters in Children 7–12 Years of Age. *Gait & Posture*. 2009, vol. 29, no. 2, pp. 317–321. doi: 10.1016/j.gaitpost.2008.09.016
14. Vette A. H., Watt J. M., Lewicke J., Watkins B., Burkholder L. M., Andersen J., Jhangri G. S., Dulai S. The Utility of Normative Foot Floor Angle Data in Assessing Toe-Walking. *The Foot*. 2018, vol. 37, pp. 65–70. doi: 10.1016/j.foot.2018.07.003
15. Voss S., Joyce J., Biskis A., Parulekar M., Armijo N., Zampieri C., Tracy R., Palmer A. S., Fefferman M., Ouyang B., Liu Y., Berry-Kravis E., O'Keefe J. A. Normative Database of Spatiotemporal Gait Parameters Using Inertial Sensors in Typically Developing Children and Young Adults. *Gait & Posture*. 2020, vol. 80, pp. 206–213. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.05.010
16. del Corral T., Vivas-Mateos J., Castillo-Pelaz M., Aguilar-Zafra S., López-de-Uralde-Villanueva I. Development of Stratified Normative Data and Reference Equations for The Timed Up and Down Stairs Test for Healthy Children 6–14 Years of Age. *Physiotherapy*. 2021, vol. 112, pp. 31–40. doi: 10.1016/j.physio.2021.03.002
17. Lencioni T., Carpinella I., Rabuffetti M., Marzegan A., Ferrarin M. Human Kinematic, Kinetic and EMG Data During Different Walking and Stair Ascending and Descending Tasks. *Scientific Data*. 2019, vol. 6, art. no. 309. doi: 10.1038/s41597-019-0323-z
18. Nedelec B., Dion K., Correa J. A., Desrosiers J. Upper Extremity Performance Test for the Elderly (TEMPA): Normative Data for Young Adults. *J. of Hand Therapy*. 2011, vol. 24, no. 1, pp. 31–43. doi: 10.1016/j.jht.2010.09.001
19. Aleksic J., Kanevsky D., Mesaros D., Knezevic O. M., Cabarkapa D., Bozovic B., Mirkov D. M. Validation of Automated Countermovement Vertical Jump Analysis: Markerless Pose Estimation vs. 3D Marker-Based Motion Capture System. *Sensors*. 2024, vol. 24, no. 20, art. no. 6624. doi: 10.3390/s24206624
20. Leardini A., Sawacha Z., Paolini G., Ingrassio S., Nativio R., Benedetti M. G. A new Anatomically Based Protocol for Gait Analysis in Children. *Gait & Posture*. 2007, vol. 26, pp. 560–571. doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.12.018
21. Stegeman D. F., Hermens H. J. Standards for Surface Electromyography: the European Project "Surface EMG for Non-Invasive Assessment of Muscles (SENIAM)". 2007, pp. 108–112. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/228486725\\_Standards\\_for\\_surface\\_electromyography\\_The\\_European\\_project\\_Surface\\_EMG\\_for\\_non-invasive\\_assessment\\_of\\_muscles\\_SENIAM#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/228486725_Standards_for_surface_electromyography_The_European_project_Surface_EMG_for_non-invasive_assessment_of_muscles_SENIAM#fullTextFileContent) (accessed: 18.03.2025).

### Information about the authors

**Ivan A. Sakun**, Master's degree in Instrument Engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Junior Researcher of the Laboratory of Movement Physiology of Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences (St Petersburg); Junior Researcher of the Research Laboratory "Motion Capture and Modeling Systems", Postgraduate Student of the Department of laser measuring and navigation systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: biomechanics; biomechanics of physical exercise; motion capture systems; personal navigation; data processing.

Address: Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6, Makarova Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: sakunia@infran.ru

<https://orcid.org/0009-0003-7810-8396>

**Dmitry B. Popov**, Master's degree in Instrument Engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Junior Researcher of the Laboratory of Vision Physiology of Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences (St Petersburg); Junior Researcher of the Research Laboratory "Motion Capture and Modeling Systems", Postgraduate Student of the Department of laser measuring and navigation systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 9 scientific publications. Area of expertise: biomechanics; therapeutic physical culture; virtual reality; augmented reality; Unreal Engine; gamification; personal navigation; data processing.

Address: Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6, Makarova Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: db.popov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4270-2349>

**Elena M. Skrebova**, Specialist in "Engineering in Biomedical Practice" (2015, Saint Petersburg Mining University), Head of the Research Laboratory "Motion Capture and Modeling Systems" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: biomechanics; motion analysis; motion capture systems; machine learning; and personal navigation.

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

E-mail: emskrebova@etu.ru

**Mikhail D. Samarokov**, Master's degree in Instrument Engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate Student of the Department of laser measuring and navigation systems of Saint Petersburg Electrotechnical University; Engineer 3<sup>rd</sup> Category of Reliability Calculation Bureau of JSC "NPP Radar MMS". The author of 8 scientific publications. Area of expertise: biomechanics; biomechanics of physical exercise; motion capture systems; personal navigation; data processing.

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

E-mail: michaelssam120900@gmail.com

**Tatyana V. Tyulkina**, Master's degree in Instrument Engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate Student of the Department of laser measuring and navigation systems of Saint Petersburg Electrotechnical University; Design Engineer 2<sup>nd</sup> Category of LLC "Alliance PROFIT". The author of 8 scientific publications. Area of expertise: product modelling; biomechanics; motion capture systems; data processing.

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

E-mail: tatyanyatyul@mail.ru

**Vladimir V. Kravchenko**, Traumatologist-Orthopedist (2025, Saint Petersburg State University) of the Pirogov Clinic of High Medical Technologies of Saint Petersburg State University. The author of 1 scientific publications. Area of expertise: traumatology; orthopaedics; knee and hip joints.

Address: Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: dr.vkravchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-4104-8405>

**Angela S. Mulyk**, Traumatologist-Orthopedist (2020, Saint Petersburg State University) of the Pirogov Clinic of High Medical Technologies of Saint Petersburg State University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: traumatology; orthopaedics; the musculoskeletal system.

Address: Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: md.amulyk@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-5041-1915>

**Alexander V. Gubin**, Dr Sci. (Medical) (2009), Professor (2010), Head of the Department of Traumatology and Orthopedics of Saint Petersburg State University; First Deputy Chief Physician and Traumatologist-Orthopedist of the Pirogov Clinic of High Medical Technologies of Saint Petersburg State University. The author of 198 scientific publications. Area of expertise: traumatology; orthopaedics; spinal disorders; developmental defects; deformities of the spine in children and adults.

Address: Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: shugu19@gubin.spb.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3234-8936>

## К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А. А. ПОТАПОВА



4 мая 2026 г. исполнилось 75 лет известному русскому ученому в области радиофизики и радиолокации, статистической радиотехники, распознавания и обработки изображений и сигналов, фрактального анализа, дробных операторов, фрактальных антенн, фрактальной электродинамики и детерминированного хаоса, доктору физико-математических наук, профессору Александру Алексеевичу Потапову.

Александр Алексеевич Потапов родился в селе Лукино Ржаксинского района Тамбовской области. После окончания с золотой медалью средней школы в 1968 г. он поступил в Рязанский радиотехнический институт на радиотехнический факультет, который окончил в 1974 г. по специальности "Радиоэлектронные устройства". Затем в 1979 г. окончил вечернее отделение (инженерный поток) физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

С 1979 г. А. А. Потапов работает в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН. За эти годы он прошел путь от младшего научного сотрудника до главного научного сотрудника (2002). В 1989 г. Александр Алексеевич защитил в МФТИ (кафедра академика Б. В. Бункина) кандидатскую диссертацию, а в 1994 г. – доктор-

скую диссертацию в ИРЭ РАН (ведущая организация – ЦКБ "Алмаз").

С 1979 г. главное научное направление работ А. А. Потапова – применение теории фракталов, текстур, дробных операторов, скейлинга и детерминированного хаоса в радиофизике, радиолокации, радиотехнике, радиоэлектронике, теории антенн, электродинамике, теории управления и широком спектре смежных научных и технических направлений для создания и развития прорывных информационных технологий. Он – инициатор постановки первых НИР и ОКР в России по радиофизическим применениям теории фракталов, скейлинговых эффектов и дробных операторов в радиосистемах.

Результаты научной деятельности А. А. Потапова по фрактальной обработке информации в интенсивных помехах, а также по фрактальным радиосистемам и фрактальным радиоэлементам опубликованы в четырех отчетных докладах Президиума Российской академии наук (Научные достижения РАН. М.: Наука, 2008, 2010, 2012 и 2013 гг.), а также в Докладе Правительству Российской Федерации: Об итогах реализации в 2011 г. Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 гг. (в 3 т. М.: Наука, 2012). Все эти приоритетные в науке результаты позволяют перейти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей.

В настоящее время на основе пионерских работ А. А. Потапова и его учеников в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН сформировано новое фундаментальное направление "Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем" и создана Российская научная школа фрактальных методов, хорошо известная в мире.

А. А. Потапов – ученый секретарь диссертационного совета при ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (1999–2018). Дважды (1997–2000 и 2000–2003 гг.) ему присуждалась Государственная научная стипендия. Он заместитель председателя научно-квалификационного семинара (НКС) по направлению "Проблемы современной радиофизики" и член НКС по направ-

лению "Информатика" в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. В период 2000–2002 гг. А. А. Потапов – профессор МИРЭА, с 2008 г. по 2019 г. – профессор Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. Член Нижегородского математического общества (2017).

В 2015 г. А. А. Потаповым впервые в мировой практике открыты, предложены, обоснованы и разработаны принципы нового вида и нового метода радиолокации, а именно, фрактально-скейлинговой, или масштабно-инвариантной радиолокации. Доказана эффективность функционалов, которая определяется топологией, дробной размерностью и текстурой принятого многомерного сигнала, для синтеза принципиально новых неэнергетических обнаружителей мало-контрастных объектов на фоне помех.

А. А. Потапов в 2022–2024 гг. сформировал парадигму "Multi-profile radio – Многопрофильное радио". Данная парадигма, основанная на принципиально новом подходе к совместному использованию физических свойств электромагнитных волн в широком диапазоне частот и универсальности топологии фрактальных множеств, открывает возможности для будущих прорывов в области радио. Этому предшествовал его цикл работ в России и Китае в 2022–2024 гг. по возможности и необходимости объединения дорожных карт "Фракталы", "Фотоника" и "Искусственный интеллект" для сквозных технологий. Конечная цель – принципиально новая архитектура радиосистем и радиоканалов. "Умная" (интеллектуальная) радиосреда – это беспроводная среда, которая превращается в интеллектуальное реконфигурируемое пространство и играет активную роль в передаче и обработке информации, а также делает более надежным обмен данными между передатчиками и приемниками. Концепция "умных" радиосред направлена на создание распределенной интеллектуальной платформы беспроводной связи, зондирования и вычислений, которая соединяет физический и цифровой миры. Такой подход предусматривает отказ от прошлого постулата о неподконтрольности беспроводной среды.

А. А. Потапов – автор первой в России монографии "Фракталы в радиофизике и радиолокации" (М.: Логос, 2002. 664 с., тир. 1000 экз.), ко-

торая в 2005 г. была переработана и дополнена (Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М.: Университетская книга, 2005. 848 с., тир. 2000 экз.). Эти две монографии стали настольными книгами ученых самых разных специальностей. А. А. Потапов – также автор и соавтор многих монографий по вопросам радиолокации и применения фракталов в науке и технике.

Чтение лекций по разработанным им в ИРЭ РАН фрактальным технологиям и доклады по проекту МНТЦ (совместно с ЦКБ "Алмаз") в 2000 и 2005 гг. в США (Вашингтон, Нью-Йорк, Хантсвилл, Атланта, Франклин), в Китае (2011 г. и по настоящее время) и на многочисленных международных конференциях (Англия, США, Канада, Голландия, Австрия, Германия, Франция, Испания, Италия, Венгрия, Греция, Турция, Шотландия, Швейцария, Швеция, Мексика, Китай, Сербия, Черногория, Болгария, Казахстан, Белоруссия, Украина) принесли ему широкую известность в кругах международной научной общественности. В 2005 г. в США состоялась знаменательная научная встреча А. А. Потапова с основателем фрактальной геометрии Б. Б. Мандельбротом, горячо поддержавшим работы А. А. Потапова.

А. А. Потапов опубликовал лично и в соавторстве свыше 1250 научных работ в отечественных и международных изданиях, включая 68 монографий и глав в книгах на русском и английском языках, 3 патента и 9 учебных пособий. На международных и всероссийских конференциях сделал более 500 докладов, из них более чем 350 пленарных и секционных докладов как приглашенный докладчик. Им разработан курс лекций по применению фракталов и вейвлетов в радиолокации для Центра подготовки специалистов Концерна "РТИ Системы" (РТИ им. акад. А. Л. Минца и ОАО НПК НИИДАР).

По монографиям А. А. Потапова поставлены курсы лекций "Фракталы в статистической радиофизике", "Статистическая теория фрактальной радиолокации", "Фракталы в радиофизике и радиолокации", "Статистическая фрактальная радиотехника", "Фракталы в машиностроении" и т. п. в различных университетах России и стран ближнего зарубежья.

А. А. Потапов – главный редактор журнала "Нелинейный мир" (2003), член редколлегий и

редакционных советов 6 российских и международных журналов. С 2015 г. является членом редакционной коллегии журнала "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника".

А. А. Потапов – почетный профессор Евразийского национального университета (Астана, Казахстан, 2010), почетный профессор Джинанского университета (Honorary Professor of Jinan University, г. Гуанчжоу, Китай, 2011). Он назначен президентом китайско-российской лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов (2012). В апреле 2015 г. А. А. Потапов в Пекине победил в международном научном конкурсе и выиграл Правительственный грант Китая "Leading Talents" по фрактальным методам обработки сигналов и изображений. С октября 2025 г. А. А. Потапов – эксперт Международного Института передовых технологий в рамках инициативы "Один пояс – один путь" (Кунышань, Китай).

А. А. Потапов – академик Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова (2008) и академик РАЕН (2007). Входит в состав оргкомитетов многочисленных международных и россий-

ских конференций. В 1997 г. награжден медалью "В память 850-летия Москвы". Награжден знаком "Почетный радист РФ" (2006) и восемнадцатью медалями. Лауреат Премии им. акад. А. М. Прохорова (2013) и Премий ВЭС ВКС (2016 и 2022). Решением Президиума Центрального Совета РНТОРЭС им. А. С. Попова в 2015 г. А. А. Потапов награжден медалью "За заслуги в развитии радиоэлектроники и связи". В честь 40-летия научной деятельности в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН и за выдающиеся достижения в области инженерных наук награжден настольной медалью им. акад. А. М. Прохорова (2019).

Высокая научная эрудиция, работоспособность, принципиальность, целеустремленность, большое чувство ответственности за дело, которым он занимается, и всепоглощающая любовь к науке принесли А. А. Потапову заслуженный авторитет и широкую известность среди ученых.

Поздравляем профессора, доктора физико-математических наук Александра Алексеевича Потапова с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, долгих лет жизни, счастья, удачи и новых научных свершений.

Редакция

## Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- электронную скан-копию рукописи (1 экз.) – файл статьи (pdf-формат) с подписями всех авторов (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц текста с аннотацией, обзорной статьи не более 20 страниц текста с аннотацией);
- электронную копию статьи (1 экз., docx-формат);
- 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;
- оригинал/скан-копию экспертного заключения о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах на русском и английском языках (1 экз., docx-формат);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.). В письме должна быть отражена следующая информация: ФИО адресата и дата подачи рукописи; цель обращения и административная информация (заглавие рукописи, состав авторского коллектива, вид статьи); краткое изложение основных результатов исследования и описание их влияния на научное знание (1–2 абзаца); заявление об отсутствии подачи статьи в другие журналы и об отсутствии какого-либо конфликта интересов.

### 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 настоятельно 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 (Source of funding);
  - 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, 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 29 № 2 2026

Vol. 29 No. 2 2026

*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 23.04.26. Дата выхода в свет 29.04.26.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Уч.-изд. л. 16.51. Печ. л. 16.0. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 47.  
Цена свободная.

Signed to print 23.04.26. Publication date 29.04.26.  
Sheet size 60×84 1/8. Educational-ed. liter. 16.51. Printed sheets 16.0.  
Number of copies 300. Printing plant 1–150 copies. Order no. 47.  
Free price.

---

Отпечатано в издательстве СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

Published by ETU Publishing house  
5 F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia