



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ОТДЕЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ,  
НАНОФИЗИКИ И  
ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ

# РЭНСИТ:

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА.  
НАНОСИСТЕМЫ.  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ.**

**2023, том 15, № 2**

ОСНОВАН В 2009 г. - печатное издание  
С 2014 г. - печатное и сетевое издание  
ВЫХОДИТ ЧЕТЫРЕ РАЗА В ГОД  
МОСКВА

*Главный редактор*

Грачёв В.И.  
grachev@cplire.ru

*Зам. гл. редактора*

Макаров В.А., д.ф.-м.н., МГУ

*Зам. гл. редактора*

Губин С.П., д.х.н., ИОНХ РАН

*Ответственный секретарь*

Капшин В.В., к.ф.-м.н., ИРЭ РАН  
kashin@cplire.ru

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

Андреев А.В., д.ф.-м.н., МГУ

Бушуев В.А., д.ф.-м.н., МГУ

Гуляев Ю.В., д.ф.-м.н., акад.РАН, ИРЭ

Дмитриев А.С., д.ф.-м.н., ИРЭ РАН

Илюшин Я.А., д.ф.-м.н., МГУ

Козарь А.В., д.ф.-м.н., МГУ

Колесов В.В., к.ф.-м.н., ИРЭ РАН

Корнилова А.А., к.ф.-м.н., МГУ

Окопуб А.В., д.ф.-м.н., ИНХ СО РАН

Орешко А.П., д.ф.-м.н., МГУ

Петров И.Б., д.ф.-м.н., ч.-к. РАН, МФТИ

Потапов А.А., д.ф.-м.н., ИРЭ РАН

Русakov В.С., д.ф.-м.н., МГУ

Сипов А.С., д.ф.-м.н., акад.РАН, МИРЭА

Солдатов Е.С., д.ф.-м.н., МГУ

Фетисов Ю.К., д.ф.-м.н., МИРЭА

Черепенин В.А., д.ф.-м.н., ч.-к.РАН, ИРЭ

Верона Э., DrSci, Италия

Кавазое Е., DrSci, Япония

Кадыржанов К.К., DrSci, Казахстан

Личэн Цзяо, Ph.D., Китай

Мак Кен Питер Пауль, DrSci, США

Сангаа Дэлег, DrSci, Монголия

Скиртач А., DrSci, Бельгия

Энхтор Л., DrSci, Монголия

**ISSN 2218-3000**

Журнал зарегистрирован в Министерстве связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Свидетельство ПИ №ФС77-38976 от 02.03.2010 г.

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой-либо форме без письменного разрешения издателя.

©РАЕН 2023

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

125009 МОСКВА, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ,  
ул. Моховая, 11, корп. 7, к. 218-219,  
тел. +7 495 629 3368, факс 495 629 3678 Грачеву В.И.

Отпечатано в изд.-полиграфич. центре "МАСКА"  
г. Москва 117303, ул. Малая Юношеская, 1/2.

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА  
С УЧЕТОМ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭМИТТЕРНЫХ  
ДОРОЖКАХ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Сергеев В.А., Ходаков А.М. .... 109

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В  
СИЛОВЫХ МОДУЛЯХ НА MOSFET-ТРАНЗИСТОРАХ

Смирнов В.И., Ходаков А.М., Гавриков А.А. .... 117

### РАДИОЛОКАЦИЯ

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПОРТРЕТОВ  
ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОЛОГИИ ДАМБ

Сидоров И.А., Гудков А.Г., Новичихин Е.П., Чижиков С.В., Порохов И.О. .... 125

### ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИКОЙ СПИНОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И  
МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Игнатьев В.К., Лебедев Н.Г., Перченко С.В., Станкевич Д.А. .... 133

### МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

РАЗРАБОТКА АУС-ДИАГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕЖПОЛУШАРНОЙ  
АСИММЕТРИИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЭГ  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОТСРОЧЕННОЙ ИШЕМИИ ГОЛОВНОГО МОЗГА  
ВСЛЕДСТВИЕ НЕТРАВМАТИЧЕСКОГО СУБАРАХНОИДАЛЬНОГО  
КРОВОИЗЛИЯНИЯ

Супшкова О.С., Морозов А.А., Кершнер И.А., Окунева И.В., Спиккин М.В. .... 139

### НАНОСИСТЕМЫ

ПОЛУЧЕНИЕ ЧАСТИЦ РУТИЛА НА ПОВЕРХНОСТИ  
ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА В  
СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ИЗОПРОПАНОЛЕ

Грошкова Ю.А., Краевский С.В., Буслаева Е.Ю. .... 153

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ  
В ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Булычев Н.А., Михайлов Ю.Г. .... 161

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕНН

Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Матвиенко Ю.В., Грачев В.И., Ткаченко  
С.А., Стадная Н.П. .... 169

ПРОБЛЕМЫ МАСШТАБИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ В  
СИСТЕМАХ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Булычев Г.Г., Черных А.В. .... 179

ПРИМЕНЕНИЕ ХИМЕРНЫХ СЕТОК ДЛЯ ЯВНОГО УЧЕТА  
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
УПРУГИХ ВОЛН

Митьковец И.А. .... 185

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМУ ПУТИ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ  
МЕТОДОМ

Кожемяченко А.А. .... 193

### IN MEMORIAM

РОСТИСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ БЕЛЯЕВ

Редакция журнала РЭНСИТ ..... 199

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ ЗАЛОГИН

Редакция журнала РЭНСИТ ..... 201

## CONTENTS

### RADIOELECTRONICS

DYNAMIC THERMOELECTRIC MODEL OF A HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR TAKING INTO ACCOUNT THE VOLTAGE DROP ON THE EMITTER METALLIZATION TRACKS

Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Khodakov ..... 109

MODELING OF THERMOELECTRICAL PROCESSES IN A POWER MOSFET MODULES

Vitaliy I. Smirnov, Alexander M. Hodakov, Andrey A. Gavrikov ..... 117

### RADIOLOCATION

RADIOMETRIC METHOD FOR SOIL MOISTURE PORTRAITS OBTAINING TO STUDY THE HYDROLOGY OF DAMS

Igor A. Sidorov, Alexander G. Gudkov, Evgeny P. Novichikhin, Sergey V. Chizhikov, Igor O. Porokhov ..... 125

### CONDENSED MATTER PHYSICS

CONTROLLING THE DYNAMICS OF SPIN POLARIZATION OF CONDUCTION ELECTRONS BY ELECTRICAL AND MECHANICAL ACTION

Vyacheslav K. Ignatiev, Nikolay G. Lebedev, Sergey V. Perchenko, Dmitry A. Stankevich ..... 133

### MEDICAL PHYSICS

DEVELOPMENT OF AUC-DIAGRAMS FOR THE ANALYSIS OF INTERHEMISPHERIC ASYMMETRY OF THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE EEG TO DETECT DELAYED CEREBRAL ISCHEMIA DUE TO NON-TRAUMATIC SUBARACHNOID HEMORRHAGE

Olga S. Sushkova, Alexey A. Morozov, Ivan A. Kershner, Irina V. Okuneva, Mikhail V. Sinkin ..... 139

### NANOSYSTEMS

PREPARATION OF RUTILE PARTICLES ON THE SURFACE OF REDUCED GRAPHENE OXIDE IN SUPERCRITICAL ISOPROPANOL

Yulia A. Groshkova, Sergey V. Kraevskii, Elena Yu. Buslaeva ..... 153

OBTAINING POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON ZINC OXIDE NANOPARTICLES SYNTHESIZED IN A PLASMA DISCHARGE UNDER THE ACTION OF ULTRASOUND

Nikolay A. Bulychev, Yuri G. Mikhaylov ..... 161

### INFORMATION TECHNOLOGIES

HOLOGRAPHIC PROCESSING OF HYDROACOUSTIC INFORMATION USING LINEAR ANTENNAS

Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Yuri V. Matvienko, Vladimir I. Grachev, Sergey A. Tkachenko, Nadezhda P. Stadnaya ..... 169

THE PROBLEMS OF SCALING COMPONENTS IN STREAMING DATA PROCESSING SYSTEMS

George G. Bulychev, Alexey V. Chernykh ..... 179

APPLICATION OF CHIMERIC MESHES FOR EXPLICIT ACCOUNTING FOR INHOMOGENEITIES IN MODELING THE PROPAGATION OF ELASTIC WAVES

Ivan A. Mitkovets ..... 185

CALCULATION OF THE MOVEMENT OF ROLLING STOCK ALONG THE RAILWAY TRACK BY THE GRID-CHARACTERISTIC METHOD

Anton A. Kozhemyachenko ..... 193

### IN MEMORIAM

IN MEMORY OF ROSTISLAV V. BELYAEV

Editorial Board RENSIT journal ..... 199

IN MEMORY OF NIKOLAY N. ZALOGIN

Editorial Board RENSIT journal ..... 201



RUSSIAN ACADEMY  
OF NATURAL SCIENCES

DEPARTMENT OF  
RADIOELECTRONICS,  
NANOPHYSICS AND  
INFORMATION TECHNOLOGIES  
PROBLEMS

# RENSIT:

**RADIOELECTRONICS.  
NANOSYSTEMS.  
INFORMATION  
TECHNOLOGIES.**

**2023, Vol. 15, no. 2**

FOUNDED IN 2009

4 ISSUES PER YEAR

MOSCOW

*Editor-in-Chief*

VLADIMIR I. GRACHEV

grachev@cplire.ru

*Deputy Chief Editor*

Vladimir A. Makarov, DrSci, MSU

*Deputy Chief Editor*

Sergey P. Gubin, DrSci, IGIC RAS

*Executive Secretary*

Vadim V. Kashin, PhD, IRE RAS

kashin@cplire.ru

### EDITORIAL BOARD

Anatoly V. Andreev, DrSci, MSU

Vladimir A. Bushuev, DrSci, MSU

Vladimir A. Cherpenin, DrSci, c-mRAS, IRE

Alexander S. Dmitriev, DrSci, IRE

Yuri K. Fetisov, DrSci, MIREA

Yuri V. Gulyaev, DrSci, acad.RAS, IRE

Yaroslav A. Ilyushin, DrSci, MSU

Anatoly V. Kozar, DrSci, MSU

Vladimir V. Kolesov, PhD, IRE

Albina A. Kornilova, PhD, MSU

Alexander V. Okotrub, DrSci, SB RAS

Aleksey P. Oreshko, DrSci, MSU

Igor B. Petrov, DrSci, c-m RAS, MIPT

Alexander A. Potapov, DrSci, IRE

Vyacheslav S. Rusakov, DrSci, MSU

Alexander S. Sigov, DrSci, c-mRAS, MIREA

Valentine M. Silonov, DrSci, MSU

Eugeny S. Soldatov, DrSci, MSU

Lkhamsuren Enkhtor, DrSci (Mongolia)

Yoshiyuki Kawazoe, DrSci (Japan)

Kayrat K. Kadyrzhanov, DrSci (Kazakhstan)

Peter Paul Mac Kenn, DrSci (USA)

Jiao Licheng, Ph.D. (China)

Deleg Sangaa, DrSci (Mongolia)

Andre Skirtach, DrSci (Belgium)

Enrico Verona, DrSci (Italy)

ISSN 2414-1267

The journal on-line is registered by the Ministry of Telecom and Mass Communications of the Russian Federation. Certificate El. no. FS77-60275 on 19.12.2014

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced in any form or by any means without permission in writing from the publisher.

©RANS 2023

EDITORIAL BOARD ADDRESS

218-219 of, 7 b., 11, Mokhovaya str.,  
125009 MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION,  
TEL. +7 495 629 3368

FAX +7 495 629 3678 FOR GRACHEV

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.109

## Динамическая теплоэлектрическая модель гетеропереходного биполярного транзистора с учетом падения напряжения на эмиттерных дорожках металлизации

<sup>1,2</sup>Сергеев В.А., <sup>1</sup>Ходаков А.М.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>

Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru), [hod22am@mail.ru](mailto:hod22am@mail.ru)

Поступила 20.03.2023, рецензирована 27.03.2023, принята 06.04.2023

**Аннотация:** Разработана динамическая 3D теплоэлектрическая модель для расчета температурного поля и плотности эмиттерного тока в гребенчатой структуре гетеропереходного биполярного транзистора (ГБТ) с учетом неоднородного распределения плотности тока под эмиттерными дорожками, обусловленного падением напряжения на сопротивлении токоведущей металлизации и действия положительной тепловой обратной связи в структуре. В основе модели лежит итерационное решение в программной среде COMSOL Multiphysics нестационарного уравнения теплопроводности совместно с системой уравнений для распределения электрического потенциала вдоль эмиттерной дорожки и плотности тока под дорожкой. Показано, что в процессе действия импульса греющей мощности в ГБТ распределение температуры и плотности тока вдоль эмиттерных дорожек меняют характер, соответственно, от однородного и монотонно спадающего до немонотонно изменяющегося. При этом максимальные температура и плотность тока достигают стационарных значений с темпом, существенно превышающим темп нарастания перегрева при однородном нагреве структуры, а максимумы температуры и плотности тока в процессе саморазогрева смещаются от начала к центру дорожек. Предложенная модель может быть использована для оценки неоднородности распределения температуры и плотности тока в структуре ГБТ и его предельных электрических параметров в импульсных режимах работы.

**Ключевые слова:** гетеропереходный биполярный транзистор, динамическая теплоэлектрическая модель, плотность тока, температура, неоднородность

УДК 621.382.029

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №22-29-01134).

**Для цитирования:** Сергеев В.А., Ходаков А.М. Динамическая теплоэлектрическая модель гетеропереходного биполярного транзистора с учетом падения напряжения на эмиттерных дорожках металлизации. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):109-116. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.109.

## Dynamic thermoelectric model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the emitter metallization tracks

<sup>1,2</sup>Vyacheslav A. Sergeev, <sup>1</sup>Alexander M. Hodakov

<sup>1</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>  
Ulyanovsk 432071, Russian Federation

<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University, <https://www.ulstu.ru/>

Ulyanovsk 432027, Russian Federation

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru), [hod22am@mail.ru](mailto:hod22am@mail.ru)

Received March 20, 2023, peer-reviewed March 27, 2023, accepted April 6, 2023

**Abstract:** A dynamic 3D thermoelectric model has been developed to calculate the temperature field and emitter current density in the comb structure of a heterojunction bipolar transistor (HBT) with the length of the emitter metallization paths comparable to the size of the crystal, taking into account the inhomogeneous distribution of current density under the emitter paths caused by a voltage drop on the resistance of the current-carrying metallization. The model is based on an iterative solution in the COMSOL Multiphysics software environment of a non-stationary heat equation together with a system of equations for the distribution of electric potential along the emitter path and the current density under the path. It is shown that during the action of the heating power pulse in the HBT, the distribution of temperature and current density along the emitter tracks change character, respectively, from homogeneous and monotonically decreasing to non-monotonically changing. At the same time, the maximum temperature and current density reach stationary values with a rate significantly exceeding the rate of overheating increase with homogeneous heating of the structure, and the maxima of temperature and current density in the process of self-heating shift from the beginning to the center of the tracks. The proposed model can be used to evaluate the thermomechanical stresses in the structure of the HBT and the limiting electrical parameters in the pulsed modes of operation of the HBT.

**Keywords:** heterojunction bipolar transistor, dynamic thermoelectric model, current density, temperature, inhomogeneity

UDC 621.382.029

*Acknowledgments:* This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-29-01134).

*For citation:* Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Khodakov. Dynamic thermoelectric model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the emitter metallization tracks. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):109-116e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.109.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (110)
  2. ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (112)
  3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ  
ВЫЧИСЛЕНИЙ (113)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (115)
- ЛИТЕРАТУРА (115)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с активной разработкой МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) и НЕМТ (High Electron Mobility Transistor) СВЧ транзисторов в современной аппаратуре радиосвязи и телекоммуникаций широко используются мощные биполярные (БТ), в том числе гетеропереходные (ГБТ), СВЧ транзисторы [1-4]. Приборы этого класса являются наименее надежным в

составе современных радиоэлектронных систем различного назначения, поскольку работают в наиболее жестких тепловых и электрических режимах. Для этого класса приборов характерно наличие сильной положительной тепловой обратной связи (ПТОС) и проявление эффектов неоднородного и неустойчивого распределения плотности тока, мощности и температуры в транзисторных структурах [5-7], которые приводят к локальным перегревам и термомеханическим напряжениям структуры и, как следствие, к ускорению механизмов деградации и отказам приборов.

Одной из наиболее распространенных геометрий структур современных мощных БТ и ГБТ является полосковая или гребенчатая геометрия с параллельным расположением элементарных транзисторов (ячеек) ГБТ (см.



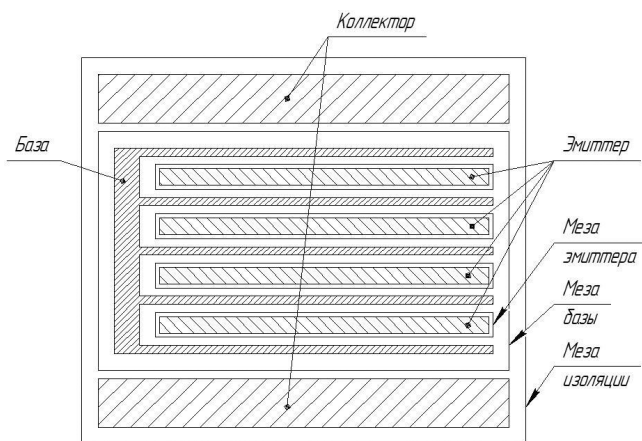


Рис. 1. Топология активной области транзисторов ГБТ [4].

Рис. 1 [4] и Рис. 2 [7]). Саморазогрев каждой ячейки ГБТ рассеиваемой мощностью и тепловая связь между соседними ячейками приводят к неравномерному температурному профилю матрицы элементарных транзисторов ГБТ. Из-за положительного температурного коэффициента эмиттерного тока через центральные ячейки ГБТ с более высокой температурой будут протекать токи большей плотности, что приводит к увеличению выделения тепла, что в конечном итоге может привести к тепловому пробую или деградации прибора [8,9], что особенно сильно проявляется при высоких уровнях инжекции [10].

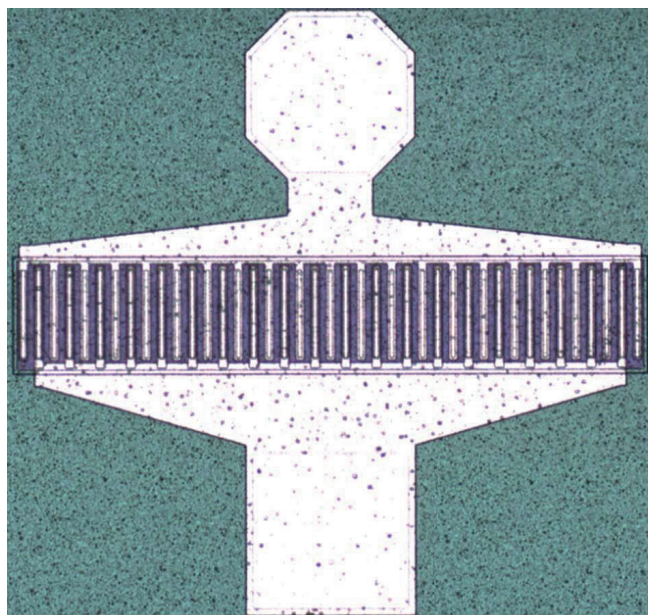


Рис. 2. Гребенчатая структура ГБТ с 20 элементарными транзисторами [7].

Чтобы снизить неравномерное распределение температуры и решить эти тепловые проблемы, используют различные варианты одномерного проектирования геометрии, включая изменение длины излучателя в ячейках ГБТ [7] и изменение расстояния между эмиттерами между ячейками ГБТ [8], что позволяет уменьшить разницу температур между отдельными ячейками.

В известных работах теплоэлектрические процессы в гребенчатых структурах ГБТ рассматривались без учета падения напряжения на токоведущих дорожках эмиттерной металлизации, которое приводит к существенному неоднородному распределению плотности эмиттерного тока, а значит и плотности рассеиваемой мощности вдоль эмиттерных дорожек [11-13].

В работе [14] нами рассмотрена стационарная теплоэлектрическая модель структуры ГБТ СВЧ транзистора с учетом падения напряжения на токоведущих дорожках эмиттерной металлизации. Показано, что распределения температуры и плотности тока вдоль эмиттерных дорожек структуры меняют свой характер: из монотонно и слабо спадающих от начала дорожки к концу в изотермическом приближении эти распределения становятся немонотонными и существенно неоднородными. Кроме того, максимум плотности тока и температуры с увеличением рабочего тока смещается от начала к центру дорожки. Заметим, что критически важным для полупроводниковых структур является не абсолютное отклонение локальной температуры структуры от среднего значения, а градиент изменения температуры, который определяет уровень термомеханических напряжений и динамику процессов электромиграции в элементах структуры [15].

В радиоэлектронных системах ГBT СВЧ транзисторы работают, как правило, не в стационарных, а импульсных режимах с длительностью и скважностью импульсов, изменяющихся в широких пределах. При этом очевидно, что в процессе действия импульса рассеиваемой мощности, распределение плотности тока и температуры в структуре будет трансформироваться. В данной статье представлена 3D теплоэлектрическая модель для расчета температурного поля и распределения плотности эмиттерного тока в гребенчатой структуре ГBT с учетом совместного влияния всех перечисленных выше факторов неоднородного распределения тока и температуры в приборной структуре, включая неоднородное распределение плотности тока под эмиттерными дорожками в результате падения напряжения на сопротивлении токоведущей металлизации.

## 2. ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На Рис. 3 изображена применяемая при расчете температурных полей геометрия модели полупроводниковой структуры ГBT, которая представляет собой прямоугольный полупроводниковый кристалл размерами  $l_x \times l_y \times l_z$ , с расположенными на его верхней поверхности эмиттерными дорожками металлизации размерами  $a_e \times L_e \times b_e$ . Кристалл размещен на идеальном теплоотводе с

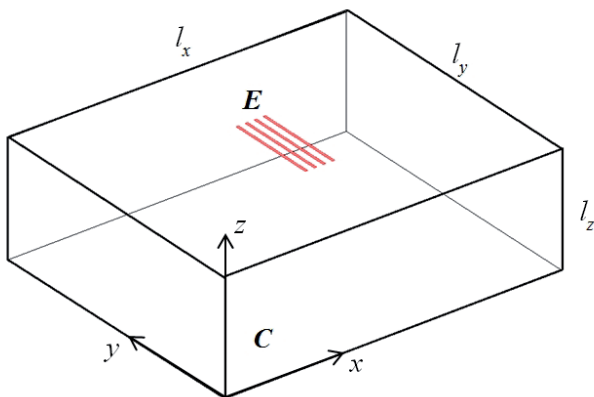


Рис. 3. Геометрия модели структуры ГBT: E – эмиттер, C – полупроводниковый кристалл.

температурой  $T_0$ . Как и в [14], полагая дорожки эмиттера узкими, пренебрежем эффектом оттеснения эмиттерного тока к боковым краям дорожек по координате x.

Температурное поле в структуре ГBT  $T(x, y, z, t)$  в произвольный момент времени  $t$  в процессе саморазогрева структуры импульсом греющей мощности находится из решения нестационарного уравнения теплопроводности

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla_{x,y,z}(\lambda(T)\nabla_{x,y,z}T) = 0, \quad (1)$$

где  $c, \rho, \lambda$  – коэффициенты теплоемкости, плотности и теплопроводности материала кристалла, со следующими граничными условиями:

- боковые поверхности и верхняя поверхность кристалла теплоизолированы;
- температура нижней поверхности кристалла равна температуре теплоотвода  $T_0$ ;
- на верхней поверхности в области эмиттера структуры задана плотность греющей мощности, определяемая по формуле:

$$q_e(T) = -\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=l_z} = \begin{cases} J_e(T)U_c, & (x, y) \in S_e \\ 0, & (x, y) \in S - S_e \end{cases}, \quad (2)$$

где  $S, S_e = na_eL_e$  – площади верхней поверхности кристалла и его активной области,  $n$  – число дорожек эмиттера,  $J_e, U_c$  – плотность тока эмиттера и напряжение на коллекторе.

В качестве начального условия для температуры при решении уравнения (1) принималось однородное распределение температуры по структуре ГBT

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Распределение плотности эмиттерного тока  $J_e$  под дорожкой эмиттерной металлизации структуры находится из решения следующей системы уравнений:

$$J_e(T) = J_{e0}(T/T_0)^3 \exp\left\{\frac{-E_g + e(U_c - \varphi_e - rS_e n^{-1} J_e(T))}{kT}\right\}, \quad (4)$$

где  $J_{e0}$  – слабо зависящий от температуры параметр,  $U_c$  – прямое падение напряжения на эмиттерном  $p$ - $n$  переходе,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника,  $e$  – заряд электрона,  $\varphi_c$  – потенциал эмиттерной металлизации,  $r$  – входное омическое сопротивление транзистора,  $k$  – постоянная Больцмана;

$$\frac{dJ_{em}(y)}{dy} = -\frac{J_e(y)}{h_e}, \quad (5)$$

$$\frac{d\varphi_e(y)}{dy} = -\frac{J_{em}(y)}{\sigma_{em}}, \quad (6)$$

$$J_{em}(y_{eb}) = I_e/h_e a_e, \quad (7)$$

$$J_{em}(y_{ee}) = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{d\varphi_e}{dy} \right|_{y=y_{eb}} = -\frac{I_e}{\sigma_{em} h_e a_e}, \quad (9)$$

$$\left. \frac{d\varphi_e}{dy} \right|_{y=y_{ee}} = 0, \quad (10)$$

где  $I_c$  – полный эмиттерный ток,  $J_{em}$  – плотность тока по металлизации эмиттерной дорожки,  $y_{eb}$  и  $y_{ee}$  – координаты начала и конца дорожки,  $\sigma_{em}$  – удельная проводимость металлизации эмиттерной дорожки.

Для обеспечения условия включения транзистора в электрическую цепь (постоянство полного эмиттерного тока  $I_e$ ) необходимо чтобы выполнялось равенство:

$$\iint_{S_e} J_e(x, y, t) dx dy = I_e. \quad (11)$$

### 3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Модельная нестационарная задача (1)-(11) решалась методом последовательных временных интервалов [16], то есть все время процесса теплопереноса было разбито на ряд интервалов  $\Delta t = t_j - t_{j-1}$ , внутри которых решалось нестационарное уравнение теплопроводности с начальными распределениями плотности мощности  $q_{cj}(x, y, z, t_{j-1})$  и температуры  $T_j(x, y, z, t_{j-1})$ , найденными в результате решения

на предыдущем интервале. Значения потенциалов  $U_c$  и  $\varphi_c$  находилось численным итерационным методом, подобный алгоритм которого представлен в работе [17]. В качестве начального приближения зависимости  $J_e^0(y)$  в итерационном процессе были выбраны значения плотности тока, рассчитанные по формуле [18]:

$$J_e^0(y) = \frac{2\varphi_{T_0}}{L_e a_e R_e} \cdot \frac{C^2}{\cos^2[C(1-y/L_e)]}, \quad (12)$$

где  $\varphi_{T_0} = \frac{kT_0}{e}$  – температурный потенциал при  $T_0 = 300$  К, значение которого равно 26 мВ;  $R_e$  – сопротивление металлизации дорожки эмиттера, а постоянная  $C$  находится из решения уравнения  $\text{ctg}C = R_e I_c / 2n\varphi_{T_0}$ .

Оригинальная программа включала в себя обращение к интерактивной программной среде COMSOL Multiphysics. Как и в работе [14], в качестве расчетного базового объекта исследования был выбран InGaP/GaAs ГБТ с размерами кристалла  $300 \times 250 \times 100$  мкм и активной структурой транзистора с четырьмя золотыми эмиттерными дорожками шириной  $a_e = 2$  мкм и толщиной  $h_e = 0.5$  мкм, при этом длина дорожек при расчетах изменялась и задавалась в пределах  $L_c = (40 \div 80)$  мкм. Функциональные зависимости от температуры теплофизических характеристик  $\epsilon$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  материала кристалла выбирались из базы данных материалов программы COMSOL. Температура идеального теплоотвода  $T_0$  принималась равной 300 К.

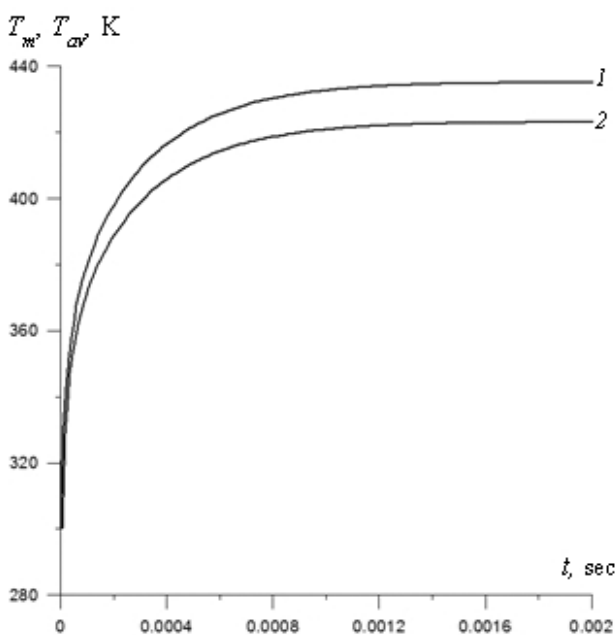
С целью сопоставления результатов расчетов с результатами расчетов по стационарной модели, численные расчеты по предложенной динамической модели приведены для варианта режима работы транзистора при  $I_e = 40$  мА,  $U_c = 7$  В. Начальное значение напряжения смещения на эмиттерном переходе  $U_c = 1.2$  В. Полный ток транзисторной структуры считался



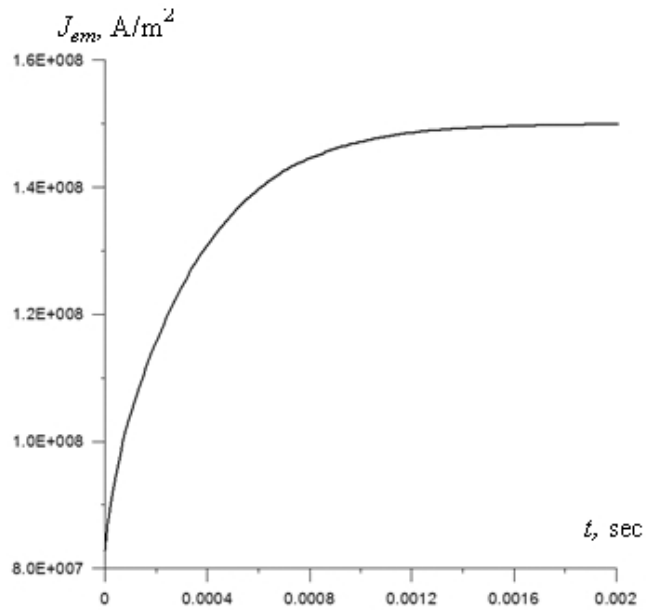
равномерно распределенным между эмиттерными дорожками металлизации.

На **Рис. 4** и **Рис. 5** показана динамика изменения максимальной и средней температуры структуры, а также максимальной плотности эмиттерного тока структуры ГБТ в процессе действия импульса греющей мощности.

Аппроксимируя изменение максимального и среднего перегрева структуры функцией вида  $\Delta T(1 - \exp(-t/\tau_T))$ , где  $\tau_T$  тепловая постоянная времени, определяющая темп нарастания перегрева, по полученным зависимостям можно оценить изменение темпа нарастания перегрева в результате неоднородного токораспределения и действия ПТОС в структуре по сравнению со случаем однородного нагрева структуры. При нагреве структуры однородно распределенной плотностью мощности  $\tau_T^{\text{homogen}} = \tau_{Tcr}$ , где  $\tau_{Tcr}$  тепловая постоянная времени кристалла, определяемая температуропроводностью  $\alpha$  материала кристалла и его толщиной  $d$ :  $\tau_{Tcr} = d^2/\alpha$ , и для GaAs кристалла толщиной 100



**Рис. 4.** Изменение максимальной (1) и средней (2) температуры активной области:  $I_e = 40$  мА,  $U_c = 7$  В;  $a_e = 2$  мкм,  $L_c = 60$  мкм,  $h_c = 0.5$  мкм.



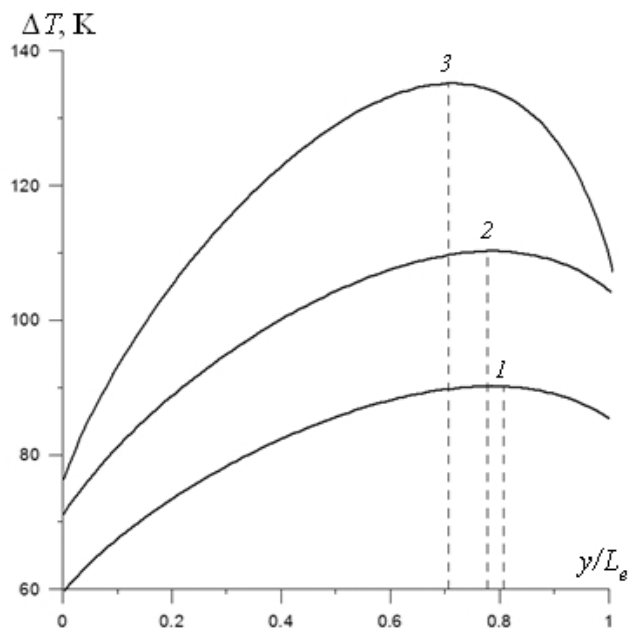
**Рис. 5.** Изменение максимальной плотности эмиттерного тока:  $I_e = 40$  мА,  $U_c = 7$  В;  $a_e = 2$  мкм,  $L_c = 60$  мкм,  $h_c = 0.5$  мкм.

мкм составляющая около 300 мкс. Из зависимостей на Рис. 4 и Рис. 5 видно и численные расчеты показывают, что постоянная тепловая времени  $\tau_T^{\text{heterogen}}$  при неоднородном нагреве и действии ПТОС составляет примерно 130 мкс, то есть в 2.3 раза меньше  $\tau_T^{\text{homogen}}$ , то есть темп изменения максимального и среднего перегрева структуры существенно превышает темп нарастания перегрева при однородном нагреве структуры. Это, очевидно, обусловлено перераспределением плотности тока вдоль эмиттерных дорожек металлизации и, соответственно, плотности мощности, рассеиваемой в коллекторном переходе ГБТ под дорожкой.

Из представленных на **Рис. 6** распределений перегрева вдоль эмиттерной дорожки в разные моменты времени видно, что в процессе нагрева ГБТ максимальное значение температуры смещается от края дорожки к ее центру, то есть к центру кристалла.

Следует еще раз отметить также, что в предложенной модели не рассматривалось перераспределение полного тока структуры





**Рис. 6.** Перегрев вдоль 3-й эмиттерной дорожки:  
 $I_e = 40$  мА,  $U_c = 7$  В;  $a_e = 2$  мкм,  $L_e = 60$  мкм,  
 $b_e = 0.5$  мкм;  $t$ : 1 – 0.15, 2 – 0.3, 3 – 2 мс.

между ячейками в результате неравномерного разогрева ячеек структуры ГBT из-за их различного расположения по отношению к краям кристалла. Этот эффект, вероятно, приведет к еще большей неоднородности распределения температуры и плотности тока в структуре и требует отдельного дополнительного анализа.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная динамическая теплоэлектрическая модель гребенчатой структуры ГBT с учетом неоднородного распределения плотности эмиттерного тока в результате падения напряжения на эмиттерных дорожках металлизации и положительной теплоэлектрической обратной связи, действующей в структуре ГBT, определяет темп и характер изменения распределения температуры и плотности тока вдоль эмиттерных дорожек структуры при действии импульса греющей мощности в ГBT: из монотонно и слабо спадающих от начала дорожки к концу в изотермическом приближении эти распределения становятся немонотонными

и существенно неоднородными. При этом максимальные температура и плотность тока достигают стационарных значений с темпом, существенно превышающим темп нарастания перегрева при однородном нагреве структуры, а максимумы температуры и плотности тока в процессе саморазогрева структуры смещаются от начала к центру дорожек. Предложенная модель может найти применение при разработке структур ГBT и оценке их предельных функциональных возможностей по току и температуре в импульсных режимах работы ГBT.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jianjun Gao. *Heterojunction Bipolar Transistors for Circuit Design: Microwave Modeling and Parameter Extraction*. United States, John Wiley & Sons Inc, 2015, 280 p.
2. Xin Wen, Akshay Arabhavi, Wei Quan. Performance Prediction of InP/GaAsSb Double Heterojunction Bipolar Transistors for THz applications. *J. Appl. Phys.*, 2021, 130:034502.
3. Lachner R. Industrialization of mmWave SiGe technologies: Status, future requirements and challenges. *IEEE 13th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*, 2013:105-107.
4. Козловский ЭЮ, Захаров СИ, Семенова ЛМ, Тейдер АА. Разработка технологии изготовления гетеробиполярных транзисторов на основе структур InGaP/GaAs. *Сб. трудов 31-ой Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, КрыМиКо"*, Севастополь, Изд. СевГУ, 2021, 3:27-29.
5. Lee CP, Chau FHF, Ma W, Wang NL. The Safe Operating Area of GaAs-Based Heterojunction Bipolar Transistor. *IEEE Trans. Electron.*, 2006, 53(11):2681-2688.
6. Chen Liang. Thermal stability improvement of a multiple finger power SiGe heterojunction

- bipolar transistor under different power dissipations using non-uniform finger spacing. *Chinese Physics B*, 2011, 20:018501.
7. Jin Dongyue. Thermal stability of the power SiGe HBT with non-uniform finger length. *Proc. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 2008:166-169; doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540331.
  8. Dongyue Jin, Wanrong Zhang, Hongyun Xie, Liang Chen, Pei Shen, Ning Hu. Structure optimization of multi-finger power SiGe HBTs for thermal stability improvement. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49(4):382-386.
  9. Rui Chen, Dong-Yue Jin, Wan-Rong Zhang, Li-Fan Wang, Bin Guo, Hu Chen, Ling-Han Yin and Xiao-Xue Jia. Thermal resistance matrix representation of thermal effects and thermal design in microwave power HBTs with two-dimensional array layout. *Chinese Phys. B*, 2019, 28(9):8502; doi: 10.1088/1674-1056/ab3436.
  10. Lu Z, Zhou L, X. Hu X. Electro-Thermal analysis of SiGe HBT under HPM Injection. *IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, 2020:1-4.
  11. Caves KY, Barnes IA. Optimum length of emitter stripes in "comb" structure transistors. *IEEE Trans*, 1965, ED-12(2):84-85.
  12. Sergeev VA, Khodakov AM. Two-Section Model of the Current Distribution in Strip Layouts of Bipolar and Hetero-Bipolar Microwave Transistors. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, 67(11):1400-1405.
  13. Сергеев В.А. Аналитическая модель неизотермического распределения плотности мощности в структурах биполярных транзисторов. *Известия вузов. Электроника*, 2005, 3:22-28.
  14. Sergeev VA, Hodakov AM. Thermoelectric model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the current-carrying metallization. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(2):103-110. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.103.
  15. Hodakov AM, Tarasov RG, Sergeev VA, Kulikov AA. Thermal deformation model of the submodule of the X-band output power amplifier. *RENSIT: Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii*, 2021, 13(1):13-18e. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.013.
  16. Коздоба ЛА. *Решение нелинейных задач теплопроводности*. Киев, Наукова думка, 1976, 136 с.
  17. Сергеев В.А., Ходаков А.М. *Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов*. Ульяновск, УЛГТУ, 2012, 159 с.
  18. Sergeev VA, Hodakov AM. Thermal model of a heterojunction bipolar transistor taking into account the voltage drop on the emitter fingers of metallization. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 2022. DOI: 10.1109/MWENT55238.2022.9802430.

**Сергеев Вячеслав Андреевич**

д.т.н., проф., член-корр. РАЕН

УФирЭ им. В.А.Котельникова РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru)

**Ходаков Александр Михайлович**

к.ф.-м.н., с.н.с.

УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: [hod22am@mail.ru](mailto:hod22am@mail.ru)

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.117

## Моделирование теплоэлектрических процессов в силовых модулях на MOSFET-транзисторах

<sup>1,2</sup>Смирнов В.И., <sup>1</sup>Ходаков А.М., <sup>1</sup>Гавриков А.А.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>,

Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru), [hod22am@mail.ru](mailto:hod22am@mail.ru), [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

Поступила 25.04.2023, рецензирована 03.05.2023, принята 10.05.2023

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация.** Представлена тепловая модель силового модуля на MOSFET-транзисторах, смонтированных на медно-керамической плате, изготовленной по технологии DBC (Direct Bond Copper – прямое присоединение меди). Анализ тепловых процессов в модуле, возникающих при импульсном нагреве отдельных транзисторов, производился на основе решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов с использованием программной среды COMSOL Multiphysics. В рамках модели был произведен расчет теплового поля по поверхности платы DBC и определены температуры перегрева всех транзисторов модуля. Результаты моделирования сравнивались с аналогичными результатами, полученными экспериментально. В качестве экспериментальных использовались результаты измерения элементов матрицы тепловых импедансов, полученных методом модуляции греющей мощности по гармоническому закону. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что расчетные и экспериментальные значения температуры перегрева кристаллов находятся в хорошем согласии друг с другом, что, в свою очередь, подтверждает корректность разработанной тепловой модели силового модуля.

**Ключевые слова:** силовой модуль, MOSFET-транзистор, тепловая модель, температурное поле, тепловое сопротивление

УДК 621.382.32

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-29-00026.

**Для цитирования:** Смирнов В.И., Ходаков А.М., Гавриков А.А. Моделирование теплоэлектрических процессов в силовых модулях на MOSFET-транзисторах. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):117-124. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.117.

## Modeling of thermoelectrical processes in a power MOSFET modules

<sup>1,2</sup>Vitaliy I. Smirnov, <sup>1</sup>Alexander M. Hodakov, <sup>1</sup>Andrey A. Gavrikov

<sup>1</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>  
Ulyanovsk 432071, Russian Federation

<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University, <https://www.ulstu.ru/>

Ulyanovsk 432027, Russian Federation

E-mail: [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru), [hod22am@mail.ru](mailto:hod22am@mail.ru), [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

Received April 25, 2023, peer-reviewed May 03, 2023, accepted May 10, 2023

*Abstract:* The paper represents thermal model of power MOSFET module based on a transistors mounted on copper-ceramic DBC (Direct Bond Copper) plate. The analysis of thermal processes in the module caused by pulse heating of particular transistors was performed by the finite elements method using COMSOL Multiphysics. The model performs estimation of the temperature field on the DBC plate and transistors overheat temperature. The modeling results was compared to the experiment – thermal impedance matrix measured by the modulation method using the heating power modulated by the harmonic law. Analysis of the data obtained allows to conclude that the calculated and experimental values of the dies overheating temperature are in good agreement with each other and confirms the correctness of the developed thermal power module model.

*Keywords:* power module, MOSFET, thermal model, temperature filed, thermal resistance

UDC 621.382.32

*Acknowledgments:* The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00026).

*For citation:* Vitaliy I. Smirnov, Alexander M. Hodakov, Andrey A. Gavrikov. Modeling of thermoelectrical processes in a power MOSFET modules. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):117-124e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.117.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (118)
2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ (118)
3. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО МОДУЛЯ (120)
4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ (121)
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (124)

## ЛИТЕРАТУРА (124)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Силовые модули нашли широкое применение в различных областях промышленности, включая транспорт, электроэнергетику, металлургию, промышленный электропривод и др. Обычно они состоят из нескольких мощных MOSFET-или IGBT-транзисторов, смонтированных на общей теплопроводящей подложке, заключенных в герметичный корпус. Основные требования, предъявляемые к силовым модулям, это способность коммутировать большие токи с высокой частотой и выдерживать большие напряжения в закрытом состоянии. В отличие от аналогичных по назначению устройств, реализованных на дискретных электронных компонентах, силовые модули обладают гораздо более высокой плотностью мощности. В них из-за плотной компоновки кристаллов резко снижены активные и паразитные связи между элементами модуля, что повышает КПД и снижает возможные перегрузки и уровень электромагнитных помех при коммутации транзисторов [1].

Особенностью работы силовых модулей является то, что в каждый момент времени в открытом состоянии находится только часть транзисторов, другие транзисторы закрыты. Результатом является неоднородный нагрев кристаллов модуля и, как следствие, неоднородное распределение температуры по поверхности подложки. Это может привести к тому, что при средней температуре по подложке в пределах нормы, некоторые кристаллы будут иметь температуру выше предельно допустимой. Чтобы этого не произошло, необходимо контролировать температуру каждого кристалла модуля. Таковую задачу можно решить либо на основе анализа тепловой модели, либо на основе измерения матрицы тепловых импедансов, которая учитывает перекрестные тепловые связи между транзисторами модуля.

### 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований являлся силовой модуль SK85MH10T производства компании Semikron, состоящий из четырех мощных MOSFET-транзисторов, смонтированных на плате, изготовленной по технологии DBC (Direct Bond Copper – прямое присоединение меди). Конструкция модуля представлена на **Рис. 1а**, где цифрами отмечены: 1 – кристалл; 2 – переключатель; 3 – плата DBC; 4 – радиатор; 5 – диэлектрик; 6 – основание модуля. Основой платы DBC является керамическая подложка из



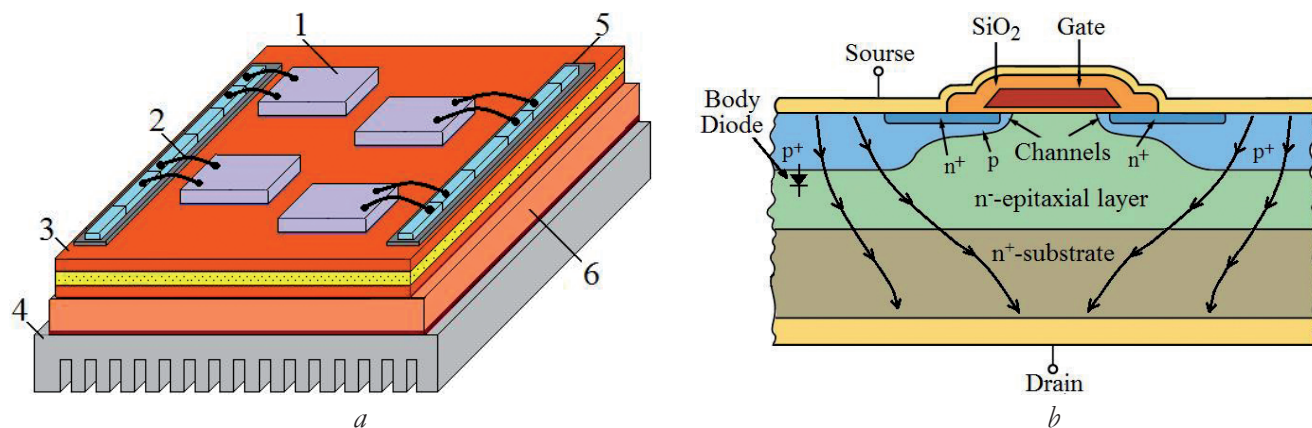


Рис. 1. Силовой модуль SK85MH10T: а) конструкция; б) структура MOSFET-транзистора.

$Al_2O_3$ , с двух сторон которой методом спекания в атмосфере кислорода присоединена медная фольга. Медная фольга обеспечивает высокую электропроводность и теплопроводность монтажному слою платы DBC, а керамическая основа – хорошие изоляционные свойства. Структура транзистора, сформированного в каждом кристалле модуля, показана на Рис. 1б.

Для исследования взаимного влияния тепловых связей между транзисторами модуля производились измерения перекрестных тепловых сопротивлений и определение элементов матрицы тепловых импедансов. При проведении таких измерений для поддержания температуры основания модуля постоянной он крепился к радиатору с помощью термопасты. После проведения измерений перекрестных тепловых сопротивлений крышка модуля была демонтирована с тем, чтобы можно было определить точные размеры кристаллов и их расположение на плате DBC, что необходимо для моделирования тепловых процессов, происходящих при пропускании импульсов греющего тока через транзисторы модуля.

На Рис. 1б показана только часть структуры мощного MOSFET-транзистора, а именно, его базовая ячейка. В действительности мощный MOSFET-транзистор состоит из множества таких базовых ячеек, количество которых может составлять несколько тысяч. Особенностью структуры является наличие в каждой базовой ячейке антипараллельного диода между  $p+$ -областью истока и  $n$ -областью стока. При открытом транзисторе, когда ток протекает от стока к истоку, антипараллельный диод никак не влияет на работу транзистора.

Тем не менее, стандартом JEDEC [2] его рекомендуется использовать для измерения температуры кристалла. Для этого через диод пропускают небольшой измерительный ток (на Рис. 1б показан стрелками) и измеряют напряжение USD между истоком и стоком, которое уменьшается по линейному закону с увеличением температуры кристалла. При этом следует учесть, что напряжение USD измеряется у множества параллельно соединенных диодов, при этом значение USD зависит от локальной температуры кристалла. В случае неоднородного распределения температуры по кристаллу измеренное напряжение USD будет определять наиболее высокую локальную температуру кристалла.

Наиболее широко используемым методом исследований теплоэлектрических процессов в силовых модулях является анализ их тепловой модели. Для построения модели часто используют принцип теплоэлектрической аналогии [3], согласно которому тепловым параметрам (тепловому потоку, температуре, тепловому сопротивлению, теплоемкости и т.д.) соответствует электрический аналог (сила тока, напряжение, сопротивление, электрическая емкость и т.д.). В этом случае объект представляется схемой замещения, состоящей из RC-цепочек, соединенных определенным образом согласно его конструкции. Обычно используют схемы замещения Кауэра или Фостера [4]. Тепловые процессы, происходящие в объекте, математически описываются аналогично электрическим процессам в схеме замещения.

Для определения параметров схемы замещения используют либо информацию о материале и геометрии элементов конструкции объекта, либо опираются на экспериментально полученные результаты. Иллюстрацией первого подхода является работа [5], в которой авторам удалось рассчитать параметры всех элементов силового модуля из шести пар IGBT-транзисторов и диодов, расположенных на медном основании, имеющим тепловой контакт с алюминиевым радиатором. Для экспериментального определения параметров схемы замещения часто используют измерения переходных характеристик. Для этого через объект пропускают последовательность импульсов греющего тока с нарастающей по логарифмическому закону длительностью и после каждого импульса измеряют отклик на это воздействие – изменение температуры кристаллов до достижения стационарного состояния. Анализ кривой нагрева позволяет определять компоненты теплового сопротивления, используемые для построения модели многокристалльной системы [6]. Довольно широко используют методы моделирования, основанные на решении уравнения теплопроводности. При этом для расчета тепловых потоков в многокристалльной системе используют либо метод конечных элементов [7], либо метод дифференциальных разностей [8].

Процессы отвода тепла от нагретых кристаллов через подложку к основанию корпуса модуля, а также латеральные потоки к соседним кристаллам модуля характеризуются матрицей тепловых импедансов  $Z_{Txy}(j\omega)$ :

$$\mathbf{T}_x(j\omega) = \mathbf{Z}_{Txy}(j\omega) \cdot \mathbf{P}_y(j\omega), \quad (1)$$

$$\text{где } \mathbf{T}_x = \begin{pmatrix} T_1 \\ \dots \\ T_m \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_y = \begin{pmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Z}_{Txy} = \begin{pmatrix} Z_{T11} & \dots & Z_{T1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{Tm1} & \dots & Z_{Tmn} \end{pmatrix}.$$

Одномерные массивы  $T_x(j\omega)$  и  $P_y(j\omega)$  представляют собой частотно-зависимые характеристики температуры в точке  $X$  и рассеиваемой мощности в точке  $Y$ , а  $Z_{Txy}(j\omega)$  определяет тепловую связь между точками  $X$  и  $Y$ . Для определения тепловой связи между каждой парой элементов, входящих в состав системы, авторы работы [9] предложили использовать метод PRBS (Pseudorandom

Binary Sequence – псевдослучайная двоичная последовательность). PRBS – это специальный сигнал, который имеет практически постоянный спектр в широком диапазоне частот. Применяя PRBS в качестве входной мощности  $P_y(t)$  и измеряя температурный отклик  $T_x(t)$ , можно определить элементы матрицы тепловых импедансов:

$$Z_{Txy}(\omega) = \frac{\mathbf{F}(T_x(t))}{\mathbf{F}(P_y(t))} = \frac{T_x(\omega)}{P_y(\omega)},$$

где  $T_x(t)$  и  $P_y(t)$  – временные представления температуры в точке  $X$  и мощности, рассеиваемой в точке  $Y$ , а  $\mathbf{F}$  обозначает дискретное Фурье-преобразование.

Другой подход был использован в работе [10], где авторы для измерения элементов матрицы использовали модуляционный метод воздействия тепловой мощности на объект измерения. Для этого через транзисторы модуля пропускалась последовательность импульсов греющего тока с фиксированной амплитудой и периодом следования, но с изменяющейся по гармоническому закону длительностью [11]. Это вызывало периодическое изменение температуры кристаллов с той же частотой модуляции, что и у греющей мощности, но со сдвигом по фазе. Измерив амплитуду переменной составляющей температуры и фазовый сдвиг, можно определить элементы матрицы тепловых импедансов.

### 3. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО МОДУЛЯ

Объектом теплового моделирования является силовой модуль SK85MH10T, конструкция которого приведена на Рис. 1а. Модуль состоит из четырех мощных MOSFET-транзисторов, смонтированных на медно-керамическую плату DBC размерами  $b \times c \times h_p$ . Транзисторы сформированы в кремниевых кристаллах квадратного сечения  $a \times a \times h_c$ . Плата DBC расположена на радиаторе, поддерживающем температуру нижней поверхности постоянной.

Температурное поле в структуре силового модуля находится из решения нестационарного уравнения теплопроводности:

$$c_i(T_i) \rho_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla_{x,y,z} (\lambda_i(T_i) \nabla_{x,y,z} T_i), (i = 1, \dots, 5) \quad (2)$$

где  $\lambda_i(T_i)$ ,  $c_i(T_i)$ ,  $\rho_i(T_i)$  – коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности слоев структуры.

Начальные и граничные условия решения задачи будут:

$$T_i(x, y, z, 0) = T_0,$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды. На верхней поверхности кристаллов транзисторов задается плотность рассеиваемой кристаллом транзистора тепловой мощности:

$$q_i(t) = -\lambda_i(T_i) \left. \frac{\partial T_i}{\partial z} \right|_{z=h_p+h_c}, (i = 1, \dots, 4). \quad (3)$$

На нижней границе модельной структуры, которая находится в зоне контакта с основанием модуля, задается условие растекания теплового потока:

$$-\lambda_5(T_5) \left. \frac{\partial T_5}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_{sp}(T_5(x, y, 0, t) - T_0),$$

где  $\alpha_{sp} = 1/(b \times c \times R_{sp})$  – эффективный коэффициент теплообмена платы DBC с основанием силового модуля и радиатором, а  $R_{sp}$  – тепловое сопротивление растекания [12]. На всех остальных свободных поверхностях  $\Sigma$  структуры силового модуля теплообмен с внешней средой отсутствует:

$$\left. \frac{\partial T_i}{\partial n} \right|_{\Sigma} = 0.$$

Решение уравнения теплопроводности (2) производилось методом конечных элементов с использованием программной среды COMSOL Multiphysics. Размеры кристалла транзистора составляли  $a \times a \times b_c = 6 \times 6 \times 0.5 \text{ мм}^3$ , а прямоугольной платы DBC  $b \times c \times b_p = 40 \times 28 \times 1.0 \text{ мм}^3$ . Основные физические свойства материалов структуры исследуемого силового модуля представлены в **Таблице 1**. Используемые при решении тепловой задачи зависимости теплофизических характеристик кремния от температуры были взяты из

**Таблица 1**

Физические параметры элементов конструкции силового модуля

Элемент структуры	Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_p$ , Дж/(кг·К)
Кристалл	Si	2330	$\lambda(T)$	$c_p(T)$
DBC плата	Cu	8700	400	385
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3900	27	776

библиотеки материалов COMSOL. Начальная температура  $T_0 = 300 \text{ К}$ .

Как и в работе [10], моделировался вариант нагрева модуля широтно-импульсно модулированными импульсами тока только двух транзисторов 1 и 2. В результате протекания через транзистор импульсов тока средняя за период следования греющая мощность изменялась по гармоническому закону:

$$P(t) = P_{av} + P_1 \sin(2\pi\nu t),$$

где  $P_{av}$  – среднее значение греющей мощности,  $P_1 = aP_{av}$  – амплитуда переменной составляющей греющей мощности,  $\nu$  – частота модуляции  $a$  – коэффициент модуляции. Амплитуда переменной составляющей греющей мощности, рассеиваемой в транзисторе 1,  $P_1 = 1.12 \text{ Вт}$ , в транзисторе 2 значение  $P_1 = 1.04 \text{ Вт}$ , при коэффициенте модуляции  $a = 0.5$ . При частоте  $\nu = 55 \text{ Гц}$  зависимости плотности мощности (3) от времени будут определяться выражением:

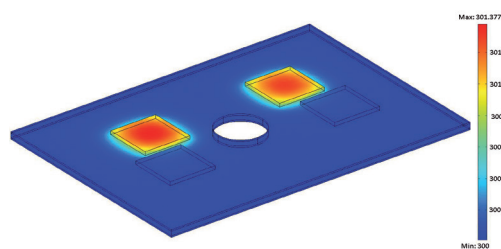
$$q_1(t) = 62222[1 + 0.5 \sin(2\pi 55t)],$$

$$q_2(t) = 57778[1 + 0.5 \sin(2\pi 55t)].$$

Эффективный коэффициент теплообмена  $\alpha_{sp}$  являлся параметром модели. Его значение вычислялось по представленной в работе [12] методике и уточнялось итерационным методом согласно экспериментальных данных температуры нагрева элемента структуры модуля. В представленном расчетном варианте такой температурой являлась температура перехода 1-го транзистора.

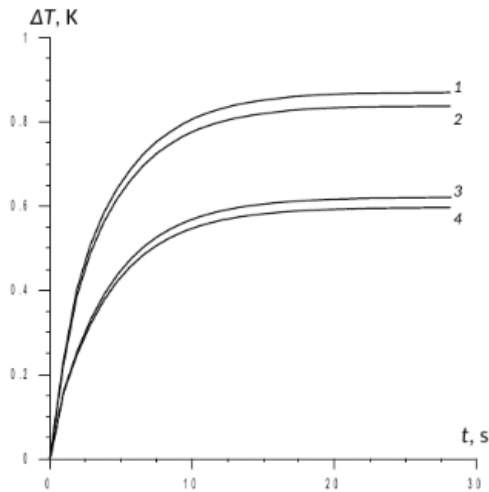
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты расчета температурного поля, созданного нагретыми кристаллами модуля при протекании импульсов тока через транзисторы №1 и №2, представлены на **Рис. 2**. Справа



**Рис. 2.** Результаты расчета температурного поля силового модуля: 1...4 – кристаллы MOSFET-транзисторов, 5 – плата DBC.





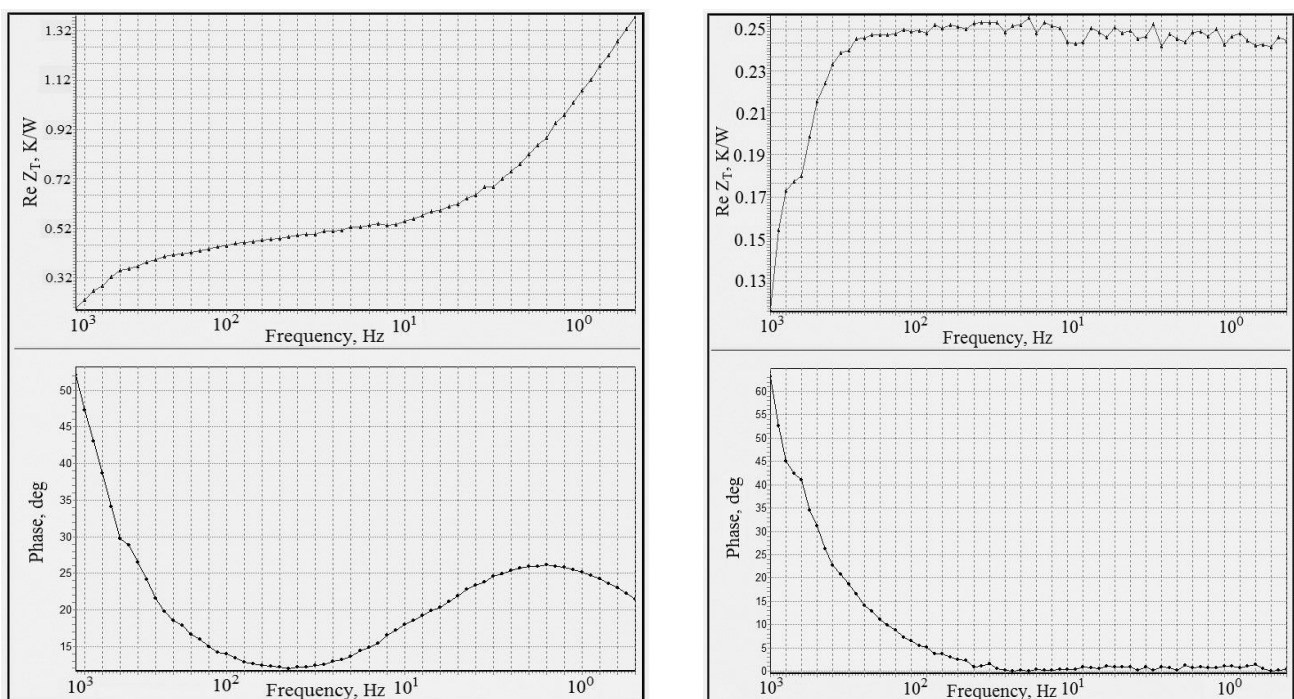
**Рис. 3.** Изменения температуры перегрева транзисторов при импульсном тепловом воздействии (номер кривой соответствует номеру кристалла транзистора).

приведена цветовая температурная шкала, позволяющая оценить температуру в различных точках модуля.

Поскольку силовые модули в основном работают в импульсном режиме, когда часть транзисторов открыта, а остальная часть закрыта, то представляет интерес динамика изменения температуры всех транзисторов, включая транзисторы в закрытом состоянии. Результаты расчета изменения температуры перегрева транзисторов при импульсном воздействии показаны на **Рис. 3**.

Результаты моделирования сравнивались с результатами экспериментальных исследований, представленных в работе [10]. Целью проведенных исследований было измерение элементов матрицы тепловых импедансов силового модуля SK85MH10T, состоящего из четырех мощных MOSFET-транзисторов, смонтированных на медно-керамическую плату. Для решения этой задачи использовался модуляционный метод измерения теплового сопротивления, использующий нагрев каждого транзистора модулированной по гармоническому закону мощностью и измерения переменной составляющей температуры всех остальных транзисторов силового модуля. Отношение амплитуды температуры перехода  $T_{j1}$  и рассеиваемой мощности  $P_1$  определяет модуль теплового импеданса  $Z_{T(\nu)}$  на частоте модуляции  $\nu$ , а отношение мнимой  $\text{Im } T_{j1}$  и вещественной  $\text{Re } T_{j1}$  Фурье-трансформант температуры перехода – тангенс фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса. Это позволило определить как диагональные, так и недиагональные элементы матрицы тепловых импедансов.

Если объект измерения имеет сложную конструкцию и тепловой поток распространяется по элементам этой конструкции от кристалла к основанию корпуса и далее через радиатор в окружающую среду, то полное тепловое

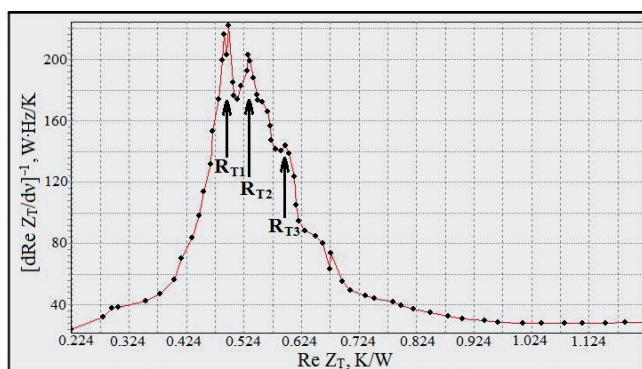


**Рис. 4.** Зависимость  $\text{Re } Z_{T(\nu)}$  (вверху) и  $\varphi(\nu)$  (внизу): а) для  $Z_{22}$ ; б) для  $Z_{13}$  [10].



сопротивление включает в себя несколько компонентов, например, "переход-корпус", "корпус-радиатор", "радиатор-окружающая среда". Их можно определить на основе измерения и анализа зависимости вещественной части  $\text{Re } Z_{T(v)}$  или фазы  $\varphi(v)$  теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности  $v$ . На **Рис. 4а** представлены результаты измерения таких зависимостей для одного из диагональных членов матрицы тепловых импедансов  $Z_{22}$ , когда импульсы греющего тока пропускались через транзистор № 2, и у него же измерялась температуры перехода  $T_{j1}$ . На **Рис. 4б** представлена аналогичная зависимость для элемента матрицы  $Z_{13}$ , когда тепловая мощность рассеивалась в транзисторе № 1, а температурный отклик измерялся у транзистора № 3. Видно, что характер зависимости  $\text{Re } Z_{T(v)}$  для  $Z_{13}$  отличается от аналогичной зависимости для  $Z_{22}$  – в ней не наблюдается рост теплового импеданса при уменьшении частоты модуляции до нескольких герц. Кроме того, в отличие от  $Z_{22}$ , не наблюдается минимум в частотной зависимости фазы  $\varphi(v)$  теплового импеданса, а само значение фазы в широком диапазоне частот составляет всего несколько угловых градусов.

При наличии нескольких компонент теплового сопротивления в зависимости  $\text{Re } Z_{T(v)}$  появляются особенности в виде пологих участков или точек перегиба. Для выявления этих особенностей производилось дифференцирование кривой  $\text{Re } Z_{T(v)}$  по частоте модуляции  $v$ . Результат обработки  $Z_{T(v)}$ , включающей в себя вычисление  $(d\text{Re } Z_{T(v)}/dv)^{-1}$  как функции  $\text{Re } Z_{T(v)}$ , представлен на **Рис. 5**. Компоненты теплового сопротивления проявляются в виде максимумов, положение



**Рис. 5.** Компоненты теплового сопротивления транзистора №2 силового модуля [10].

которых относительно оси абсцисс определяет их значения. Для транзистора № 2 значения этих компонент равны  $R_{T1} = 0.495$  К/Вт,  $R_{T2} = 0.532$  К/Вт и  $R_{T3} = 0.596$  К/Вт. Результаты аналогичных измерений для других транзисторов модуля отличаются между собой не более, чем на 3%.

Поочередный нагрев всех транзисторов модуля на разных частотах модуляции греющей мощности и измерение отклика на это воздействие позволили определить диагональные и недиагональные элементы матрицы тепловых импедансов  $Z_{T_{xy}}$  [10]:

$$Z_{T_{xy}} = \begin{pmatrix} 0.534+0.102j & 0.263 & 0.243 & 0.268 \\ 0.267 & 0.532+0.104j & 0.273 & 0.263 \\ 0.264 & 0.278 & 0.546+0.103j & 0.268 \\ 0.273 & 0.261 & 0.264 & 0.536+0.100j \end{pmatrix} \quad (4)$$

Диагональные члены матрицы являются комплексными величинами, вещественные части которых определяют компоненты теплового сопротивления "переход-основание модуля" всех транзисторов модуля. Для недиагональных членов матрицы, определяющих перекрестные тепловые связи между транзисторами, фаза не превышает  $2^\circ$ , поэтому мнимая часть недиагональных членов практически равна нулю.

Используя элементы матрицы  $Z_{T_{xy}}$  (4), и зная мощность, рассеиваемую в тех или иных транзисторах, можно по формуле (1) рассчитать температуру кристалла любого транзистора силового модуля. Для проверки этого производился одновременный нагрев 1-го и 2-го транзисторов модулированной по гармоническому закону мощностью, и измерялись температуры перегрева  $\Delta T$  всех транзисторов модуля. Результаты приведены в первой строке Таблицы 1. Во второй строке **Таблицы 2** приведены результаты расчета температуры перегрева, опирающегося на измеренные значения элементов матрицы тепловых импедансов  $Z_{T_{xy}}$  и мощность рассеяния в 1-м и 2-м транзисторах. В третьей

**Таблица 2.**

Результаты измерения и расчета температуры перегрева транзисторов модуля

	$\Delta T_r, K$	$\Delta T_g, K$	$\Delta T_{g'}, K$	$\Delta T_{g''}, K$
Эксперимент	0.87	0.82	0.63	0.61
Расчет на основе $Z_{T_{xy}}$	0.87	0.84	0.62	0.60
Расчет на основе модели	0.88	0.86	0.59	0.58

строке приведены результаты моделирования, использующие численный метод решения уравнения теплопроводности. Видно, что значения температуры перегрева всех транзисторов силового модуля, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой, что подтверждает корректность разработанной тепловой модели силового модуля.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования теплоэлектрических процессов в силовом модуле, состоящим из четырех мощных MOSFET-транзисторов, предложена тепловая модель, основанная на решении уравнения теплопроводности методом конечных элементов с использованием программной среды COMSOL Multiphysics. В рамках модели был произведен расчет теплового поля при импульсном воздействии тепловой мощности на часть кристаллов модуля. Это позволило оценить степень теплового влияния кристаллов между собой и рассчитать температуры перегрева всех кристаллов модуля.

Для проверки достоверности полученных результатов моделирования производилось их сравнение с аналогичными результатами, полученными экспериментально. В качестве экспериментальных использовались результаты измерения элементов матрицы тепловых импедансов, полученных модуляционным методом, а также результаты непосредственных измерений температуры перегрева кристаллов при импульсном воздействии тепловой мощности на отдельные кристаллы модуля. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что расчетные и экспериментальные значения температуры перегрева кристаллов находятся в хорошем согласии друг с другом, следовательно, разработанная модель адекватно описывает тепловые процессы в рассматриваемом силовом модуле.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верхулевский К.А. Новые силовые модули компании Microsemi на основе карбида кремния. *Компоненты и технологии*, 2013, 4:138-142.
2. Thermal Impedance Measurements for Vertical Power MOSFETs (Delta Source-Drain Voltage Method). JEDEC JESD24-3 standard.

3. Аронов В.А., Федотов Я.А. *Исследование и испытание полупроводниковых приборов*. М., Высшая школа, 1975, 325 с.
4. Вяхирев В.В. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов. *Технологии в электронной промышленности*, 2013, 3:90-92.
5. Brückner T, Bernet S. Estimation and Measurement of Junction Temperatures in a Three-Level Voltage Source Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22:3-12.
6. Luo Z, Ahn H, Nokali M. A thermal model for insulated gate bipolar transistor module. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19:902-907.
7. Yun C, Malberti P, Ciappa M, Fichtner W. Thermal Component Model for Electrothermal Analysis of IGBT Module Systems. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2001, 24:401-406.
8. Drogenik U, Kolar JW. Teaching Thermal Design of Power Electronic Systems with Web-Based Interactive Educational Software. *18th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2003, 1:1029-1036.
9. Davidson JN, Stone DA, Foster MP. Real-time prediction of power electronic device temperatures using PRBS-generated frequency-domain thermal cross-coupling characteristics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30:2950-2961.
10. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Шорин А.М. Измерение перекрестных тепловых сопротивлений силовых модулей. *Журнал радиоэлектроники*, 2019, 7:1-15.
11. Smirnov VI, Sergeev VA, Gavrikov AA, Shorin AM. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*, 2018, 80:205-212.
12. Sadeghi E, Bahrami M, Djilali N. Thermal Spreading Resistance of Arbitrary-Shape Heat Sources on a Half-Space: A Unified Approach. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2010, 2:267-277.

**Смирнов Виталий Иванович**

*д.т.н., профессор*

УФ ИРЭ РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: smirnov-vi@mail.ru

**Ходаков Александр Михайлович**

*к.т.н., с.н.с.*

УФ ИРЭ РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: hod22am@mail.ru

**Гавриков Андрей Анатольевич**

*к.т.н., с.н.с.*

УФ ИРЭ РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: a.gavrikoff@gmail.com.

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.125

## Радиометрический метод получения портретов влажности почвы для исследования гидрологии дамб

<sup>1</sup>Сидоров И.А., <sup>1</sup>Гудков А.Г., <sup>1,2</sup>Новичихин Е.П., <sup>1</sup>Чижиков С.В., <sup>3</sup>Порохов И.О.

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, <https://bmstu.ru/>  
Москва 105005, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru/>

Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

<sup>3</sup>ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга, <http://www.cnirti.ru/>

Москва 105066, Российская Федерация

*E-mail: igorasidorov@yandex.ru, profgudkov@gmail.com, epnov@mail.ru, chigikov95@mail.ru, ds4@cnirti.ru*

*Поступила 11.04.2023, рецензирована 18.04.2023, принята 25.04. 2023*

*Представлена действительным членом РАЕН А.А. Потаповым*

**Аннотация:** Рассматриваются методы мониторинга состояния искусственных гидросооружений с использованием трассовых СВЧ-радиометров, с целью своевременного обнаружения мест подземных протечек для обеспечения безаварийной эксплуатации. Описаны несколько практических примеров использования СВЧ-радиометров на различных наземных подвижных носителях. Приводятся характеристики СВЧ-радиометров, применяемых на практике для гидрологического мониторинга земляных дамб. Показана возможность обнаружения потенциально опасных участков дамб, мест эрозий покрытия дамбы, возможные места подземных протечек. Рассматривается возможность комплексирования СВЧ-радиометров с другими средствами дистанционного зондирования, такими как оптические видеокамеры, тепловые инфракрасные камеры и георадары. Обоснованы преимущества мультисенсорного зондирования для повышения надежности обнаружения мест подземных протечек.

**Ключевые слова:** СВЧ-радиометры, земляная дамба, дистанционное зондирование, радиояркость температура, реликтовое излучение, беспилотные летательные аппараты, влажность почвы

**УДК 681.7.069.32**

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-19-00063, <https://rscf.ru/project/22-19-00063>.

**Для цитирования:** Сидоров И.А., Гудков А.Г., Новичихин Е.П., Чижиков С.В., Порохов И.О. Радиометрический метод получения портретов влажности почвы для исследования гидрологии дамб. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):125-132. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.125.

## Radiometric method for soil moisture portraits obtaining to study the hydrology of dams

**Igor A. Sidorov, Alexander G. Gudkov, Sergey V. Chizhikov**

Bauman Moscow State Technical University, <https://bmstu.ru/>  
Moscow 105005, Russian Federation

*E-mail: igorasidorov@yandex.ru, profgudkov@gmail.com, chigikov95@mail.ru*

**Evgeny P. Novichikhin**

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazinsky Branch, <http://fire.relarn.ru/>  
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

*E-mail: epnov@mail.ru*

## Igor O. Porokhov

A.I. Berg Central Scientific-Research Radioengineering Institute, <http://www.cnirti.ru/>  
Moscow 105066, Russian Federation

E-mail: ds4@cnirti.ru

Received April 11, 2023, peer-reviewed April 18, 2023, accepted April 25, 2023

**Abstract:** The methods for the artificial hydraulic structures condition monitoring using trace microwave radiometers are considered, in order to timely detect places of underground leaks to ensure trouble-free operation. Several practical examples of the use of microwave radiometers on various ground-based mobile carriers are described. The characteristics of microwave radiometers used in practice for hydrological monitoring of earthen dams are given. The possibility of detecting potentially dangerous sections of dams, places of erosion of the dam cover, possible places of underground leaks is shown. The possibility of combining microwave radiometers with other means of remote sensing, such as optical video cameras, thermal infrared cameras and georadars, is being considered. The advantages of multisensory sensing to increase the reliability of detecting places of underground leaks are substantiated.

**Keywords:** microwave radiometers, earth dam, remote sensing, radio brightness temperature, relic radiation, unmanned aerial vehicles, soil moisture

UDC 681.7.069.32

**Acknowledgments:** The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-19-00063 <https://rscf.ru/project/22-19-00063>.

**For citation:** Igor A. Sidorov, Alexander G. Gudkov, Evgeny P. Novichikhin, Sergey V. Chizhikov, Igor O. Porokhov. Radiometric method for soil moisture portraits obtaining to study the hydrology of dams. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2023, 15(2):125-132e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.125.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (126)
2. АППАРАТУРА И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ (127)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ДАМБ (129)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (131)

## ЛИТЕРАТУРА (131)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Известны примеры практического использования СВЧ-радиометров для мониторинга гидрологической обстановки вдоль трасс трубопроводов [1], для обнаружения нефтяных пленок на поверхности воды [2], для мониторинга состояния шоссе и дорог [3], для определения координат очагов лесных и торфяных пожаров [4], для определения влагосодержания в продуктивном слое почвы для нужд точного земледелия [5]. Данная статья посвящена актуальной теме СВЧ-радиометрического мониторинга земляных дамб с целью обнаружения мест

подземных протечек, для своевременного принятия мер предотвращения катастрофы [6], на основе многолетнего практического опыта применения СВЧ-радиометров [7-14].

Для защиты низменных территорий в долинах рек и морских побережий от затопления, регулирования стока воды с целью водоснабжения, для сельскохозяйственных и промышленных нужд, по грубой оценке, в мире построены десятки тысяч километров дамб различных типов. Точных статистических данных об общей длине дамб в мире не существует, учтены лишь наиболее крупные объекты, включенные в реестр плотин Международной комиссией по большим плотинам. Безопасная, безаварийная эксплуатация искусственных гидросооружений – чрезвычайно важная задача, поскольку, как правило, прорыв дамбы приводит к катастрофическим последствиям с существенным экономическим ущербом, человеческими жертвами и серьезными



экологическими последствиями для всего региона, подвергшегося затоплению, особенно если в зону затопления попали объекты нефтегазовой инфраструктуры, трубопроводы, объекты добычи, переработки или хранения углеводородных продуктов. На ликвидацию последствий катастрофы могут потребоваться годы...

Наиболее часто встречающейся причиной прорыва дамбы является перелив, который может возникнуть вследствие несоответствия реального водосброса расчетным значениям, засорение водосброса посторонним мусором. Второй по частоте причиной аварий является проседание грунта и неустойчивость склонов плотины. Третьей причиной аварий являются подземные протечки, вызывающие внутреннюю эрозию тела плотины, образование пустот с последующим проседанием или подвижкой грунта.

Следовательно, своевременное выявление мест подземных протечек в земляных дамбах с последующим их устранением позволяет предотвращать возможные аварии и катастрофы.

В Королевстве Нидерланды примерно половина территории страны отвоевана у моря и располагается ниже уровня моря. Береговая линия сформирована наносными дюнами. За ними располагаются отвоёванные у моря земли, называемые польдерами и защищённые дюнами и искусственными дамбами от морских вод. Общая протяженность защитных дамб превышает три тысячи километров. В Нидерландах располагается и самая длинная дамба Европы – Афслейтдейк, длиной тридцать километров. Проблема защиты от наводнений и регулировки водного баланса особенно актуальна в Нидерландах, где организован специальный департамент по защите от наводнений — Ватерсхап, который организует постоянный мониторинг искусственных гидросооружений с привлечением самых современных методов

дистанционного зондирования, в том числе и метод СВЧ-радиометрии.

Цель настоящей работы – показать результаты практического использования СВЧ-радиометров для мониторинга состояния земляных дамб, возможности поиска мест подземных протечек, выявления мест с нарушением защитных покрытий дамб и выявление мест эрозии дамбы под защитным слоем, с использованием различных средств транспортировки радиометров – беспилотных летательных аппаратов, специальных машин, квадроцикла и ручной тележки.

## 2. АППАРАТУРА И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

СВЧ-радиометры, предназначенные для дистанционного зондирования, могут размещаться на различных платформах – космических, авиационных и наземных. Радиометры размещенные на космических спутниках, например, известная радиометрическая система MIRAS разработки Европейского космического агентства, работающая в  $L$ -диапазоне с пассивным синтезом апертуры, предназначенная для измерения влажности почвы и солености океанской воды, лучшая в своем классе по многим параметрам, совершенно не применима для обнаружения протечек в земляных дамбах, поскольку система обеспечивает размер разрешаемого элемента более 35 километров, что превышает длину самой протяженной европейской дамбы [7]. Ранее проводились эксперименты по обнаружению мест протечек в земляных дамбах при помощи сканирующего радиометра, размещенного на борту самолета, с высоты 300 метров [1]. Разрешаемый элемент составлял примерно 20 метров. Такого разрешения явно недостаточно для точного определения координат места протечки. Приемлемую разрешающую способность, порядка полуметра, могут обеспечить трассовые радиометрические системы, размещенные на предельно малых

высотах, так как разрешающая способность трассовых радиометров без синтеза апертуры антенны определяется шириной главного луча диаграммы направленности антенны, которая приблизительно равна отношению длины волны к величине апертуры. Обычно величина апертуры таких антенн не превышает 1-2 длин волн, что для  $L$ -диапазона (длина волны 21 см) составит примерно половину метра. Этот характерный размер и определяет минимальные габариты радиометра. Радиометры с такими габаритами могут иметь массу от двух до двадцати килограмм и могут быть легко размещены на беспилотном летательном аппарате, специальной дорожной машине, квадроцикле, либо перемещается на тележке. Использование БПЛА в качестве носителя СВЧ-радиометра (Рис. 1) имеет то преимущество, что для съемки становится доступным практически любой участок дамбы, когда перемещение по земле затруднено. К недостаткам данного способа перемещения является пониженная разрешающая способность или детальность обзора. Разрешающая способность СВЧ-радиометра равна высоте размещения радиометра над поверхностью земли. При полете БПЛА над дамбой для обеспечения безопасности полета высота должна быть не менее 10 метров, соответственно и разрешаемый элемент будет иметь размер порядка 10 на 10 метров. Этого достаточно для обнаружения



Рис. 1. Размещение радиометра на БПЛА.



Рис. 2. Зондирование дамбы при помощи автокрана.

мест подземных протечек, но совершенно недостаточно для точного выявления мест эрозии покрытия дамб. При перемещении радиометра при помощи автокрана (Рис. 2) разрешающая способность составит от 1 до 2 метров в зависимости от настройки стрелы крана, но эта величина может существенно изменяться из-за неровностей дорожного покрытия. Кроме того, громоздкий кран может пройти не везде. Размещение радиометра на квадроцикле существенно повышает проходимость, но разрешающая способность при этом стабильна и составляет 1 метр – высота установки радиометра (Рис. 3). Но квадроцикл также не всегда может перемещаться по всей поверхности дамбы. Для труднодоступных мест применяется перемещение радиометра на тележке (Рис. 4) или переноска на руках

Основные параметры радиометра представлены в Таблице 1.



Рис. 3. Система из двух радиометров на квадроцикле.





Рис. 4. Перемещение радиометра на тележке.

Метод обнаружения протечек в дамбах основан на том, что СВЧ-радиометр способен принимать и измерять мощность собственного радиотеплового излучения, возникшего под землей в глубине, прошедшего через толщу породы и излученного в открытое пространство. Одновременно с излучением дамбы радиометр принимает и часть отраженного от поверхности земли реликтового излучения небесной сферы с добавкой собственного излучения атмосферы. Излучение может приниматься одновременно на одной или на разных длинах волн (диапазонах частот) и на двух поляризациях волны – вертикальной и горизонтальной. Глубина зондирования определяется выбранной длиной волны, влажностью и минерализацией почвы, и

обычно лежит в диапазоне от одной до пяти длин волн. Для зондирования дамб удобно использовать  $L$ -диапазон (длина волны 21 см.), так как при этом обеспечивается достаточная глубина зондирования и в этом диапазоне есть полоса частот (от 1400 до 1427 МГц.), специально выделенная для работы радиоастрономов и пассивных локаторов.

По измеренным значениям радиоярких температур на вертикальной  $T_{\text{яв}}$  и горизонтальной  $T_{\text{яг}}$  вычисляется индекс поляризации  $I_p$  по формуле:

$$I_p = (T_{\text{яв}} - T_{\text{яг}}) / (T_{\text{яв}} + T_{\text{яг}}).$$

Значение индекса поляризации слабо зависит от температуры слоя почвы и в основном определяется значением диэлектрической проницаемости почвы, которая зависит от влагосодержания. Зависимость индекса поляризации от влажности почвы различна при различных условиях и зависит от материала и толщины покрытия дамбы, материала насыпи, наличия растительного покрова и др. Для точного определения радиационно-влажностной зависимости требуется специальная калибровка радиометрической системы, применительно к конкретным условиям.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ДАМБ

Система из двух радиометров, совмещенных с приемником спутниковой навигационной системы, была использована для изучения асфальтового покрытия на дамбе Лауверс-Мер (Нидерланды). Система измеряет интенсивность собственного радиотеплового излучения подстилающей поверхности одновременно на двух поляризациях в  $L$ -диапазоне, и запоминает ее цифровые отсчеты вместе с навигационной информацией. Измеренные системой радиояркие температуры особенно чувствительны к изменениям материала покрытия дамбы и влажности почвы (диэлектрическим свойствам). Например, диэлектрическая проницаемость

Таблица 1

Параметры радиометра

Параметр	Значение
Центральная частота приемного модуля, МГц	1412±30
Ширина полосы приема, МГц	50 ±20
Количество приемных каналов	1
Способ обзора	трассовый
Ширина обзора, Н - высота над землей	1.0xH
Чувствительность, К	0.5
Тип регистратора	SD-Card
Время непрерывной записи, час, не менее	8
Напряжение питания, В	12
Потребляемая мощность, Вт, не более	6
Масса, кг	8.5
Габаритные размеры, мм	500X400X80

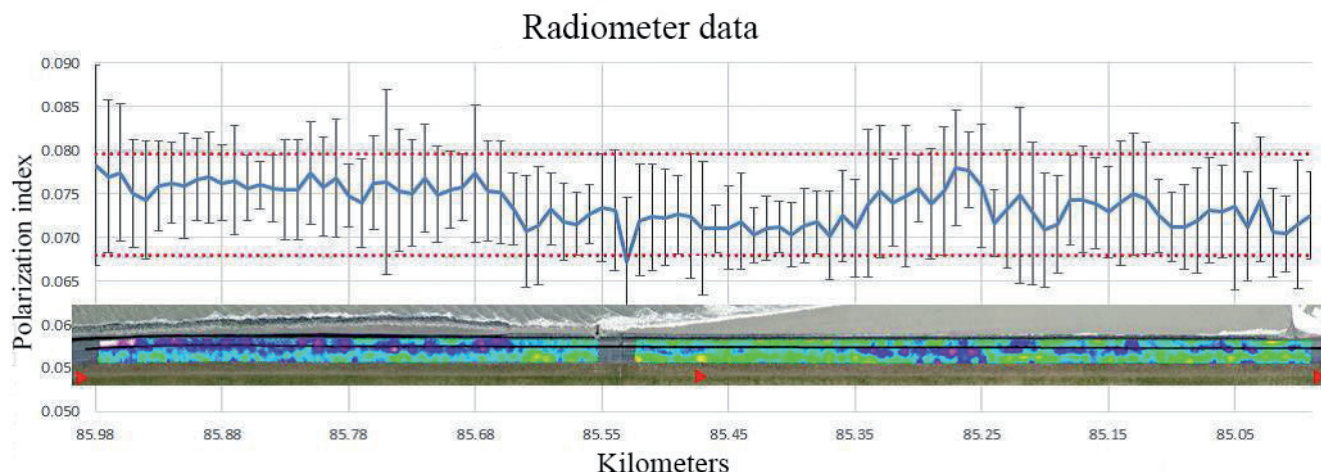


Рис. 5. Результаты исследования километрового участка дамбы.

воды равна 80, асфальта – около 5, воздуха – 1. Измеряя радиояркие температуры одновременно в двух поляризациях, определяется индекс поляризации, как показатель структуры асфальта. График зависимости индекса поляризации от продольной координаты, полученный в ходе натурного эксперимента на дамбе Лауверс-Мер, представлен на **Рис. 5**. На том же графике показан фрагмент построенной по этим данным карты влагосодержания почвы вдоль траектории движения носителя. На карте зеленым цветом показаны участки дамбы с нормальным увлажнением, синим цветом – участки с повышенным увлажнением и фиолетовым места с критическим переувлажнением. Такие места регистрировались, фотографировались и в них брались пробы (шурфы) асфальтового покрытия с целью выявления причин переувлажнения. Фотографии критических мест и проб асфальта представлены на **Рис. 6**. В ходе лабораторного исследования проб было выявлено, что первая проба содержит внутренние пустоты, а вторая места с рыхлой структурой асфальта. И том и в другом случае покрытие неспособно эффективно защищать дамбу от внешних метеорологических факторов и требует ремонта. В ходе эксперимента вместе с радиометрической съемкой производилась фото и видео съемка для документирования результатов, а также съемка тепловой

инфракрасной камерой, данные которой хорошо коррелируются с данными радиометров и дополняют их более точной информацией о температуре поверхности дамбы.

Наличие мест с поврежденным асфальтным покрытием дамбы со временем может привести к эрозии тела дамбы, подземным протечкам, вымыванию грунта и, как следствие, к образованию пустот, которые могут вызвать подвижку грунта или частичное обрушение с катастрофическими последствиями. СВЧ-радиометры, которые способны обнаруживать воду в глубине дамбы, совершенно не чувствительны к

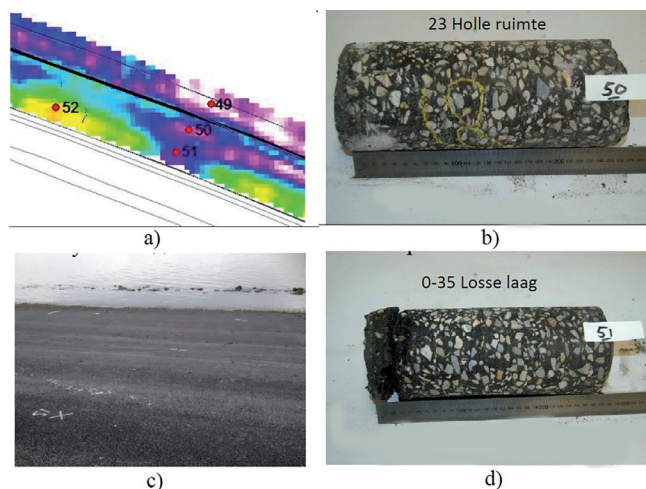


Рис. 6. Карта участка дамбы с фото проб покрытия в критических точках. а) карта влажности дамбы; б) фото керна в точке 50 – пустоты; в) фото участка дамбы; д) фото керна в точке 51 – рыхлая структура.



подземным пустотам. Но для обнаружения подземных пустот с успехом могут применяться георадары. Георадар – это специализированный активный радиолокатор, предназначенный для зондирования подземных объектов. Принцип его действия основан на генерировании и излучении в землю через передающую антенну электромагнитного импульса и приеме отраженного от различных подземных неоднородностей сигналов. Отраженные импульсы принимаются приемной антенной с некоторой задержкой, зависящей от удаленности неоднородности от антенны. Полное отсутствие отраженных сигналов в каком-либо диапазоне дальностей означает наличие пустоты в этом диапазоне.

Таким образом, совместное использование нескольких типов датчиков – СВЧ-радиометров, оптических камер, инфракрасных камер и георадара дает достаточно данных для комплексного обследования состояния дамб с выработкой рекомендаций для проведения мероприятий обеспечивающих долговечную и безаварийную эксплуатацию.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- метод СВЧ-радиометрического зондирования может с успехом применяться для мониторинга состояния дамб, поиска мест подземных протечек и эрозии покрытия;
- в качестве носителя радиометра могут использоваться беспилотный летательный аппарат, автокран, квадроцикл или тележка;
- мультисенсорное зондирование с использованием кроме СВЧ-радиометра оптической видеокamеры, тепловой инфракрасной камеры и георадара повышает вероятность обнаружения мест подземных протечек, эрозии покрытия и наличие подземных пустот.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров ИА, Гудков АГ, Систер ВГ, Иванникова ЕМ, Леушин ВЮ. Мониторинг гидрологической обстановки вдоль трасс трубопроводов методами микроволновой радиометрии. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2020, 11:34-36.
2. Гудков АГ, Систер ВГ, Иванникова ЕМ, Леушин ВЮ, Плющев ВА, Сидоров ИА, Четыркин ДЮ. О возможности обнаружения нефтяных пленок на поверхности воды методами СВЧ-радиометрии. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2019, 1:34-36; doi: 10.1007/s10556-019-00580-2.
3. Сидоров ИА, Солдатенко АП, Гудков АГ, Леушин ВЮ, Новичихин ЕП. Результаты натурных экспериментов по мониторингу гидрологической обстановки вдоль автомобильных дорог многочастотной поляриметрической системой СВЧ-радиометров. *Машиностроитель*, 2015, 12:46-55.
4. Систер ВГ, Иванникова ЕМ, Гудков АГ, Леушин ВЮ, Сидоров ИА, Плющев ВА, Солдатенко АП. Определение очагов лесных и торфяных пожаров с помощью СВЧ-радиометрического зондирования. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2016, 2:32-33.
5. Верба ВС, Гуляев ЮВ, Шутко АМ, Плющев ВА, Сидоров ИА, Никитов СА и др. (всего 45 авторов). *СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике*. София, Акад. изд-во им. проф. Марина Дринова, 2013, 296 с. ISBN 978-954-322-708-2.
6. Jeu RDe, Parinussa R, Biemond L, Haarbrink R, Shutko A, Demontoux F, Provoost Y. Safety inspection of levees with L-band radiometry. *Proc. 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, MicroRad-2010, IEEE Catalog Number: CFP1092D-PRT*, p. 96-98. Washington, DS, USA, 2010. DOI: 10.1109/MicroRad16079.2010.

7. Яценко АС, Бобров ПП. Особенности обработки данных SMOS Level 1С в задачах дистанционного зондирования. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017, 14(3):78-91. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-78-91.
8. Shutko A, Abramov V, Haldin A, Novichikhin E, Krapivin V, Golovachev S, Pliushchev V, Sidorov I, Biriukov E, Haarbrink R, Archer F, Hristov P, Gavrilov E. Sea surface and land-sea contact zones sensing at passive microwaves and in optical band. *ECOLOGICA* (Belgrad), 2009, 55:345-349.
9. Shutko AM, Krapivin VF, Haarbrink RB, Sidorov IA, Novichikhin EP, Archer F, Krissilov AD. *Practical Microwave Radiometric Risk Assessment*. Sofia, Prof. Marin Drinov Publ. House, Bulg. Academy of Sciences, 1910, 100 pp.
10. Archer, F, Shutko A, Coleman TL, Haldin A, Sidorov I, Novichikhin E. Microwave Remote Sensing of Land Surface from Mobile Platform: The Alabama 2003-2005 Experiment. Abstract. To be presented at "The Int 7IEEE 2006 Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS'06)", Denver, CO, USA, 31 July- 04 August, 2006.
11. Sidorov IA, Gudkov AG, Leushin VYu, Gorlacheva EN, Novichikhin EP, Agasieva SV. Measurement and 3D Visualization of the Human Internal Heat Field by Means of Microwave Radiometry. *Sensors*, 2021, 21(12):4005; doi: 10.3390/s21124005.
12. Vesnin SG, Sedankin MK, Ovchinnikov LM, Gudkov AG, Leushin VYu, Sidorov IA, Goryanin II. Portable microwave radiometer for wearable devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 318:112506; doi: 10.1016/j.sna.2020.112506.
13. Gudkov AG, Agasieva SV, Sidorov IA, Khokhlov NF, Chernikov AS, Vagapov Yu. A portable microwave radiometer for proximal measurement of soil permittivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198:107076. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107076.
14. Shutko AM, Haldin A, Krapivin V, Novichikhin E, Sidorov I, Tishchenko Y, Haarbrink R, Georgiev G, Kancheva R, Nikolov H, Coleman T, Archer F, Pampaloni P, Paloscia S, Krissilov A, Carmona A. Microwave radiometry in monitoring and emergency mapping of water seepage and dangerously high ground waters. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2007, 1:76-82. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/228698604\\_Microwave\\_radiometry\\_in\\_monitoring\\_and\\_emergency\\_mapping\\_of\\_water\\_seepage\\_and\\_dangerously\\_high\\_groundwaters#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/228698604_Microwave_radiometry_in_monitoring_and_emergency_mapping_of_water_seepage_and_dangerously_high_groundwaters#fullTextFileContent).

**Сидоров Игорь Александрович**

*к.т.н., доцент*

Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана  
**5, ул. 2-я Бауманская, Москва 105005, Россия**  
**igorasidorov@yandex.ru**

**Гудков Александр Григорьевич**

*д.т.н., профессор*

Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана  
**Москва 105005, Россия**  
**profgudkov@gmail.com**

**Новичихин Евгений Павлович**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
**Фрязино 141190, Моск.обл., Россия**  
**ernov@mail.ru**

**Чижиков Сергей Владимирович**

*аспирант*

Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана  
**Москва 105005, Россия**  
**chigikov95@mail.ru**

**Порохов Игорь Олегович**

*к.т.н.*

ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга  
**Москва 107078, Россия**  
**ds4@cnirti.ru.**

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.133

## Управление динамикой спиновой поляризации электронов проводимости электрическим и механическим воздействием

Игнатьев В.К., Лебедев Н.Г., Перченко С.В., Станкевич Д.А.

Волгоградский государственный университет, <https://volsu.ru/>

Волгоград 400062, Российская Федерация

E-mail: [vkignatjev@yandex.ru](mailto:vkignatjev@yandex.ru), [nikolay.lebedev@volsu.ru](mailto:nikolay.lebedev@volsu.ru), [perchenko@volsu.ru](mailto:perchenko@volsu.ru), [dimon50002004@yandex.ru](mailto:dimon50002004@yandex.ru)

Поступила 27.04.2023, рецензирована 04.05.2023, принята 11.05.2023

Представлена действительным членом РАЕН А.В. Андреевым

**Аннотация:** Предложена квантовая модель взаимодействия коллективизированного электрона проводимости с кристаллическим полем в однородном и изотропном деформированном поликристалле с учётом спин-орбитального взаимодействия. Получено динамическое уравнение движения спина электрона проводимости в напряжённо-деформированном металле. Показано, что в условиях неоднородного кручения в стационарном случае средний спин электронов проводимости ориентирован преимущественно вдоль вектора плотности тока. Максимальное значение величины спин-орбитального взаимодействия наблюдается, когда ось кручения ортогональна вектору плотности тока.

**Ключевые слова:** спин-орбитальное взаимодействие, переходные металлы, функции Ванье, дисторсия кручения

PACS: 67.57.Lm, 72.25.Ba, 75.76.+j

**Благодарности:** Исследование выполнено за счёт средств гранта Российского научного фонда № 22-22-20035 (<https://rscf.ru/project/22-22-20035/>) и за счёт средств бюджета Волгоградской области.

**Для цитирования:** Игнатьев В.К., Лебедев Н.Г., Перченко С.В., Станкевич Д.А. Управление динамикой спиновой поляризации электронов проводимости электрическим и механическим воздействием.

РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):133-138. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.133.

## Controlling the dynamics of spin polarization of conduction electrons by electrical and mechanical action

Vyacheslav K. Ignatiev, Nikolay G. Lebedev, Sergey V. Perchenko, Dmitry A. Stankevich

Volograd State University, <https://volsu.ru/>

Volograd 400062, Russian Federation

E-mail: [vkignatjev@yandex.ru](mailto:vkignatjev@yandex.ru), [nikolay.lebedev@volsu.ru](mailto:nikolay.lebedev@volsu.ru), [perchenko@volsu.ru](mailto:perchenko@volsu.ru), [dimon50002004@yandex.ru](mailto:dimon50002004@yandex.ru)

Received April 27, 2023, peer-reviewed May 04, 2023, accepted May 11, 2023

**Abstract:** A quantum model for the interaction of a collectivized conduction electron with a crystal field in a homogeneous and isotropic deformed polycrystalline sample, taking into account the spin-orbit interaction, is proposed. A dynamic equation of motion of the conduction electron spin in a stress-strained metal is obtained. It is shown that under conditions of inhomogeneous torsion in the stationary case, the average spin of conduction electrons is oriented predominantly along the current density vector. The maximum value of the spin-orbit interaction is observed when the torsion axis is orthogonal to the current density vector.

**Keywords:** spin-orbit interaction, transition metals, Wannier functions, torsional strain

PACS: 67.57.Lm, 72.25.Ba, 75.76.+j

*Acknowledgments:* The research was carried out of the funds of the Russian Science Foundation grant № 22-22-20035 (<https://rscf.ru/en/project/22-22-20035/>), as well as the funds of the Volgograd region budget resources..

*For citation:* Vyacheslav K. Ignatiev, Nikolay G. Lebedev, Sergey V. Perchenko, Dmitry A. Stankevich. Control of the dynamics of spin polarization of conduction electrons by electrical and mechanical action. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):133-138e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.133.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (134)
  2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ (134)
  3. УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ СПИНА В  
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ  
(135)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (137)
- ЛИТЕРАТУРА (137)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений современной спинтроники является изучение спиновых потоков в проводниках и полупроводниках с целью их использования в различного рода устройствах микроэлектроники [1,2]. В последние десятилетия сформировалось новое научное направление физики конденсированного состояния – стрейнтроника, использующая физические эффекты в веществе, обусловленные деформациями, возникающими в микро-, нано- и гетероструктурах под действием внешних управляющих полей, приводящих к изменению электронного строения, электрических, магнитных, оптических и других свойств материалов [3]. Одна из ветвей стрейнтроники направлена на изучение влияния механических напряжений на электронные свойства вещества.

Ранее в рамках построенных авторских моделях напряжённно-деформированного ферромагнетика получено решение уравнений типа Ландау-Лифшица-Гильберта в виде динамической петли гистерезиса [4] и показано, что кристаллическое поле эффективно взаимодействует со спиновыми моментами локализованных электронов [5], а учёт спин-орбитального взаимодействия может эффективно поляризовать электроны проводимости в макроскопической области [6].

В настоящей работе рассмотрено динамическое управление поляризацией переменными по величине и направлению током и дисторсией кручения. Новизна предлагаемого подхода заключается в учёте в модельном

гамильтониане коллективизированных электронов проводимости взаимодействия с кристаллическим полем деформированного металла с помощью релятивистских спин-орбитальных поправок второго порядка. Ранее такое взаимодействие не принималось во внимание, так как в недеформированном кристалле оно не создает макроскопической когерентной поляризации спиновых токов.

### 2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Рассмотрим механически индуцированную поляризацию спина электрона проводимости в однородном и изотропном поликристалле. Взаимодействие коллективизированного электрона с кристаллическим полем выбирается в виде спин-орбитального взаимодействия с ионами решётки, то есть релятивистских поправок во втором порядке по величине  $1/c$ , где  $c$  – скорость света. Энергия кулоновского взаимодействия электронов проводимости друг с другом, а также с остальными электронами кристаллита, как коллективизированными, так и локализованными в ионах решётки, то есть с кристаллом в рамках метода самосогласованного поля учтена заменой их массы на эффективную массу  $m$ .

Пусть в кристаллите  $N$  узлов, в каждом из которых находятся одинаковые ионы с эффективным зарядом  $+Ze$ . Такая решётка создает возмущение потенциальной энергии электрона в точке с радиус-вектором  $\mathbf{r}$  и соответствующее электрическое поле

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\frac{eZ}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^N \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_k}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k|^3},$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $e$  – элементарный заряд,  $\mathbf{r}_k$  – радиус-вектор  $k$ -го узла решётки. Величину эффективного заряда  $Z$  можно оценить, приравняв координату максимума радиальной компоненты водородоподобной волновой функции к ковалентному радиусу атома. Например, для платины радиус атома равен



$1.39 \cdot 10^{-10}$  м, что для  $6s$  оболочки соответствует  $Z \approx 22.45$ .

Спин-орбитальная добавка в энергию электрона имеет вид [7]

$$\hat{V} = \frac{\hbar e}{2m^2 c^2} [\mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \hat{\mathbf{p}}] \hat{\mathbf{s}}, \quad (1)$$

где  $m$  – эффективная масса электрона с зарядом  $-e$ , где  $\hbar$  – постоянная Дирака,  $\hat{p}$  и  $\hat{s}$  – операторы импульса и спина электрона.

Динамика спина электрона, создаваемая возмущением (1), описывается уравнением для средних [8]

$$\begin{aligned} \frac{ds_\alpha}{dt} &= \frac{i}{\hbar} \langle [\hat{V}, \hat{s}_\alpha] \rangle = \\ &= -\frac{e^2 Z \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}}{8\pi\varepsilon_0 m^2 c^2} \sum_{k=1}^N \left\langle \left[ \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_k}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_k|^3} \times \hat{\mathbf{p}} \right]_\beta \hat{s}_\gamma \right\rangle, \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$  – единичный антисимметричный тензор Леви-Чивитты. Греческие индексы здесь и далее обозначают пространственные переменные.

Волновую функцию коллективизированного электрона проводимости выберем в виде функции Ванье [9]:

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \Psi(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{R}_n),$$

где  $\Psi(\mathbf{r})$  – водородоподобная функция электрона,  $\mathbf{R}_n$  – вектор решётки.

После суммирования по спиновым переменным, положив  $\langle \hat{\mathbf{s}} \rangle = \mathbf{s}$  и выполнив замену переменных  $\mathbf{r} - \mathbf{r}_k \rightarrow \mathbf{r}$ , получаем уравнение

$$\begin{aligned} \frac{ds_\alpha}{dt} &= -\frac{\hbar e^2 Z \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}}{8\pi\varepsilon_0 m^2 c^2 N} s_\gamma \sum_{n,m,k=1}^N \exp(i\mathbf{k}(\mathbf{R}_n - \mathbf{R}_m)) \times \\ &\times \langle \Psi(\mathbf{r} + \mathbf{r}_k - \mathbf{R}_m) \left| \frac{\hat{I}_\beta}{r^3} \right| \Psi(\mathbf{r} + \mathbf{r}_k - \mathbf{R}_n) \rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\hat{I}$  – оператор орбитального момента электрона.

Водородоподобные функции малы при  $r > na_B/Z$ , где  $a_B = 5.29 \cdot 10^{-11}$  м – боровский радиус,  $n$  – главное квантовое число. Поэтому среднее в правой части выражения (2) отлично от нуля только при  $\mathbf{R}_n - \mathbf{r}_k = 0$  или  $\mathbf{a}_v$  и  $\mathbf{R}_m - \mathbf{r}_k = 0$  или  $\mathbf{a}_v$ , где  $\mathbf{a}_v$  – вектор, проведённый к ближайшему соседнему узлу. Тогда с учётом эрмитовости оператора орбитального момента получаем

$$\begin{aligned} \frac{ds_\alpha}{dt} &= -\frac{\hbar e^2 Z \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}}{4\pi\varepsilon_0 m^2 c^2} s_\gamma \times \\ &\times \left\{ \cos(\mathbf{k}\mathbf{a}_v) \operatorname{Re} \langle \Psi_v^+ \left| \frac{\hat{I}_\beta}{r^3} \right| \Psi \rangle + \sin(\mathbf{k}\mathbf{a}_v) \operatorname{Im} \langle \Psi_v^- \left| \frac{\hat{I}_\beta}{r^3} \right| \Psi \rangle \right\}. \end{aligned}$$

Здесь  $\Psi_v^\pm(\mathbf{r}) = \Psi(\mathbf{r} + \mathbf{a}_v) \pm \Psi(\mathbf{r} - \mathbf{a}_v)$  – функции с чётностью, совпадающей (индекс "+") с чётностью и противоположной (индекс "-") чётности функции  $\Psi(\mathbf{r})$ . В уравнении подразумевается суммирование по индексу  $v$  по парам симметрично расположенных ближайших соседних узлов.

Введя волновой вектор  $\mathbf{k} = -\mathbf{j}m/(e\hbar n_e)$ , где  $\mathbf{j}$  – плотность зарядового тока,  $n_e$  – концентрация электронов проводимости, получим в первом порядке малости по  $\mathbf{k}\mathbf{a}_v$  уравнение движения спина электрона проводимости:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{s}}{dt} &= [\{\mathbf{I} - \mathbf{J}\} \times \mathbf{s}], \\ \mathbf{I} &= \frac{\hbar e^2 Z}{4\pi\varepsilon_0 m^2 c^2} \sum_v \operatorname{Re} \langle \Psi_v^+ \left| \frac{\hat{I}}{r^3} \right| \Psi \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

$$J_\alpha = \frac{eZj_\beta}{4\pi\varepsilon_0 m c^2 n_e} \sum_v a_{v\beta} \operatorname{Im} \langle \Psi_v^- \left| \frac{\hat{I}_\alpha}{r^3} \right| \Psi \rangle.$$

В недеформированном кристаллите в силу замороженности орбитального момента [10] величина  $\mathbf{J} = 0$ .

### 3. УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ СПИНА В НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ

Рассмотрим неоднородную дисторсию, при которой точка, в том числе узел кристалла с координатой  $\mathbf{r}$ , переводится в новое положение с координатой  $\mathbf{r}'$  на вектор смещения  $\mathbf{u}$ , связанной с исходной известными соотношениями [11]

$$r'_\alpha = r_\alpha + u_\alpha, \quad dr'_\alpha = (\delta_{\alpha\beta} + u_{\alpha\beta}) dr_\beta, \quad u_{\alpha\beta} = \partial_\beta u_\alpha,$$

с помощью которых нетрудно получить сдвиговые производные:

$$\begin{aligned} dr_\beta &= (\delta_{\alpha\beta} + u_{\beta\alpha})^{-1} dr'_\alpha \approx (\delta_{\alpha\beta} - u_{\beta\alpha}) dr'_\alpha, \\ \frac{\partial}{\partial r'_\alpha} &= \frac{\partial r_\beta}{\partial r'_\alpha} \frac{\partial}{\partial r_\beta} = \partial_\alpha - u_{\beta\alpha} \partial_\beta. \end{aligned}$$

Используя сдвиговые производные, оператор орбитального момента и волновую функцию можно представить в виде

$$\hat{l}'_{\alpha} = -i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}r'_{\beta} \frac{\partial}{\partial r'_{\gamma}} = \hat{l}_{\alpha} - i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma} (u_{\beta}\partial_{\gamma} - r_{\beta}u_{\delta\gamma}\partial_{\delta}), \quad (4)$$

$$\Psi(\mathbf{r}') = \Psi(\mathbf{r}) + \partial_{\alpha}\Psi \cdot u_{\alpha\beta}r_{\beta}.$$

Соответственно при деформации меняются ориентации кристаллических осей и орбиталей валентных электронов. При дисторсии кручения образца вдоль оси  $\mathbf{n}$  вида  $\mathbf{\Omega}(\mathbf{r}) = \mathbf{n}(\mathbf{r}\mathbf{n})\omega$ , где  $\omega$  – погонное кручение, рад/м, ограничиваясь первыми степенями дисторсии, получаем

$$u_{\beta} = \omega\varepsilon_{\beta\sigma\nu}n_{\sigma}n_{\mu}r_{\nu}r_{\mu},$$

$$u_{\delta\gamma} = \omega\varepsilon_{\delta\sigma\nu}n_{\sigma}n_{\mu} (r_{\nu}\delta_{\mu\gamma} + r_{\mu}\delta_{\nu\gamma}) =$$

$$= \omega\varepsilon_{\delta\sigma\nu}n_{\sigma}n_{\gamma}r_{\nu} + \omega\varepsilon_{\delta\sigma\gamma}n_{\sigma}n_{\mu}r_{\mu},$$

$$\hat{\mathbf{l}}' = \hat{\mathbf{l}} + \omega(\mathbf{nr})[\mathbf{n} \times \hat{\mathbf{l}}] + \omega[\mathbf{n} \times \mathbf{r}](\mathbf{n}\hat{\mathbf{l}}),$$

$$\hat{l}'_{\alpha} = \hat{l}_{\alpha} + \omega\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}n_{\beta}n_{\delta} (r_{\delta}\hat{l}_{\gamma} + r_{\gamma}\hat{l}_{\delta}),$$

$$\Psi(\mathbf{r}') = \Psi(\mathbf{r}) + i\mathbf{\Omega}(\mathbf{r})\hat{\mathbf{l}}\Psi(\mathbf{r}) =$$

$$= \Psi(\mathbf{r}) + i\omega n_{\beta}n_{\delta}r_{\delta}\hat{l}_{\beta}\Psi(\mathbf{r}).$$

В линейном по  $\omega$  приближении с учётом эрмитовости оператора момента и коммутационных соотношений

$$[\hat{l}_{\alpha}, \hat{l}_{\beta}] = i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}\hat{l}_{\gamma}, \quad [\hat{l}_{\alpha}, r_{\beta}] = i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}r_{\gamma}$$

получим выражения для средних

$$\langle \Psi'_{\nu} | \Psi'_{\nu} \rangle - \langle \Psi_{\nu} | \Psi_{\nu} \rangle = i\omega n_{\beta}n_{\delta} \langle \Psi_{\nu} | r_{\delta}\hat{l}_{\beta} - \hat{l}_{\beta}r_{\delta} | \Psi \rangle =$$

$$= \omega\varepsilon_{\beta\delta\gamma}n_{\beta}n_{\delta} \langle \Psi_{\nu} | r_{\gamma} | \Psi \rangle = 0,$$

$$\langle \Psi'_{\nu} | \hat{l}'_{\alpha} | \Psi'_{\nu} \rangle - \langle \Psi_{\nu} | \hat{l}_{\alpha} | \Psi \rangle =$$

$$= \omega n_{\beta}n_{\delta} \langle \Psi_{\nu} | \hat{l}_{\alpha}r_{\delta}\hat{l}_{\beta} - \hat{l}_{\beta}r_{\delta}\hat{l}_{\alpha} + \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}r_{\delta}\hat{l}_{\gamma} + \varepsilon_{\alpha\beta\gamma}r_{\gamma}\hat{l}_{\delta} | \Psi \rangle =$$

$$= 2\omega\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}n_{\beta}n_{\delta} \langle \Psi_{\nu} | r_{\gamma}\hat{l}_{\delta} | \Psi \rangle.$$

Подставим эти соотношения в формулу для оператора  $\mathbf{J}$  в уравнение (3):

$$J_{\alpha'} = \frac{\omega eZ}{2\pi\varepsilon_0 m c^2 n_e} \varepsilon_{\alpha'\beta'\gamma'} n_{\beta'} n_{\delta'} j_{\sigma'} \sum_{\nu} a_{\nu\sigma'} \text{Im} \langle \Psi_{\nu}^{-} | \frac{r_{\gamma'} \hat{l}_{\delta'}}{r^3} | \Psi \rangle. \quad (5)$$

Соотношение (5) записано в системе координат, связанной с осями кристаллита. Введем лабораторную систему координат, связанную с приборами, которые задают ток проводимости и дисторсию и измеряют компоненты спина. Компоненты векторов

и тензоров в лабораторной системе будем обозначать нештрихованными индексами, а в системе координат, связанной с кристаллическими осями, штрихованными.

Преобразуем векторы плотности тока и оси кручения из лабораторной системы в систему кристаллических осей  $j_{\sigma'} = p_{\sigma'\sigma} j_{\sigma}$ ,  $n_{\delta'} = p_{\delta'\delta} n_{\delta}$ , а векторы  $\mathbf{I}$  и  $\mathbf{J}$  из системы кристаллических осей – в лабораторную  $J_{\alpha} = p_{\alpha\alpha'}^{-1} J_{\alpha'}$ , где  $p_{a'a}$  – унитарная матрица поворота, которую удобно выражать через углы Эйлера. Подставив это преобразование в уравнение (3) и усредним вектор  $\mathbf{s}$  в макроскопической области по случайным ориентациям кристаллитов:

$$\frac{d\bar{\mathbf{s}}}{dt} = [\{\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{J}}\} \times \bar{\mathbf{s}}] + [\{\delta\mathbf{I} - \delta\mathbf{J}\} \times \delta\mathbf{s}] \quad (6)$$

$$\delta\mathbf{I} = \mathbf{I} - \bar{\mathbf{I}}, \quad \delta\bar{\mathbf{I}} = 0, \quad \delta\mathbf{J} = \mathbf{J} - \bar{\mathbf{J}}, \quad \delta\bar{\mathbf{J}} = 0.$$

Здесь черта сверху означает усреднение по случайным ориентациям кристаллитов,

$$\bar{I}_{\alpha} = \frac{\hbar e^2 Z}{4\pi\varepsilon_0 m^2 c^2} p_{\alpha\alpha'}^{-1} \sum_{\nu} \text{Re} \langle \Psi_{\nu}^{+} | \frac{\hat{l}_{\alpha'}}{r^3} | \Psi \rangle,$$

$$\bar{J}_{\alpha} = \frac{\omega eZ}{2\pi\varepsilon_0 m c^2 n_e} \varepsilon_{\alpha'\beta'\gamma'} p_{\alpha\alpha'}^{-1} p_{\beta'\beta} p_{\sigma'\sigma} p_{\delta'\delta} n_{\beta'} n_{\delta'} j_{\sigma'} \times$$

$$\times \sum_{\nu} a_{\nu\sigma'} \text{Im} \langle \Psi_{\nu}^{-} | \frac{r_{\gamma'} \hat{l}_{\delta'}}{r^3} | \Psi \rangle. \quad (7)$$

Аналитическое усреднение уравнений (7) дает

$$\bar{\mathbf{I}} = 0, \quad \bar{\mathbf{J}} = \omega K [\mathbf{n} \times [\mathbf{n} \times \mathbf{j}]],$$

$$K = \frac{eZ}{12\pi\varepsilon_0 m c^2 n_e} \sum_{\nu} \text{Im} \langle \Psi_{\nu}^{-} | \mathbf{a}_{\nu} \frac{[\mathbf{r} \times \hat{\mathbf{l}}]}{r^3} | \Psi \rangle. \quad (8)$$

Максимальное значение величины  $J$  получается, когда ось кручения ортогональна вектору плотности тока. В этом случае

$$\bar{\mathbf{J}} = -\omega K \mathbf{j}. \quad (9)$$

Из уравнения (3) следует, что модуль спина одиночного электрона сохраняется в недеформированном кристаллите. Из уравнения (6) видно, что при наличии неоднородной дисторсии модуль среднего по образцу спина не сохраняется из-за второго слагаемого в правой части. Поэтому его можно рассматривать как релаксационное и по аналогии с уравнением Блоха-Бломбергена записать в виде

$$\left[ \overline{\{\delta \mathbf{I} - \delta \mathbf{J}\} \times \delta \mathbf{s}} \right] = -\frac{\overline{\mathbf{s}} - \overline{\mathbf{s}}_e}{\tau}, \quad (10)$$

где  $\overline{\mathbf{s}}_e$  – равновесное значение среднего по образцу спина,  $\tau$  – время продольной релаксации. В этом случае стационарное состояние в (6) соответствует ориентации среднего спина параллельно или антипараллельно вектору  $\overline{\mathbf{J}}$ . Усредняя возмущение (1) по квантовому состоянию и по случайным ориентациям кристаллитов аналогично выполненному усреднению его коммутатора, получим, что энергия состояний, когда средний спин ориентирован параллельно или антипараллельно вектору  $\overline{\mathbf{J}}$ , составляет  $\pm \hbar |\overline{\mathbf{J}}|/2$ , соответственно.

Тогда при конечной температуре  $T$  с учётом формулы (9) равновесное значение среднего по образцу спина в уравнении (10) запишем в виде:

$$\overline{\mathbf{s}}_e = -\frac{\mathbf{j}}{2j} \operatorname{th} \left( \frac{\hbar \omega K j}{2k_B T} \right),$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана. Таким образом, уравнение динамики среднего спина электрона (6) принимает вид

$$\frac{d\overline{\mathbf{s}}}{dt} = -\omega K [\mathbf{j} \times \overline{\mathbf{s}}] - \tau^{-1} \left( \overline{\mathbf{s}} + \frac{\mathbf{j}}{2j} \operatorname{th} \left( \frac{\hbar \omega K j}{2k_B T} \right) \right). \quad (11)$$

В стационарном случае средний по поликристаллическому образцу спин электронов проводимости будет ориентирован преимущественно вдоль вектора плотности тока  $\mathbf{j}$ , как это было показано ранее в работе [6].

Для  $s$ -электрона с  $l = 0$  в соотношении (8) все интегралы равны нулю. В переходных металлах  $s$  и  $p$  зоны перекрываются [10]. Поэтому коллективизированные электроны проводимости могут формироваться из электронов  $p$ -состояний. В кристаллите ось локализации максимальной электронной плотности  $p$ -электрона будет ориентирована в направлении  $v$ -пары ближайших соседей, то есть вдоль вектора  $\mathbf{a}_v$ . Направим полярную ось  $z$  вдоль вектора  $\mathbf{a}_v$  и будем отсчитывать азимутальный угол  $\varphi$  от плоскости  $\mathbf{a}_v r$ . Тогда волновая функция электрона может быть представлена в виде:

$$\Psi(\mathbf{r}) = i \sqrt{\frac{3}{4\pi}} R_{n_l}(r) \cos(\theta),$$

где  $R_{n_l}(r)$  – радиальная часть волновой функции  $p$ -электрона,  $\theta$  – полярный угол. Тогда из формулы (8) следует вид коэффициента  $K$ :

$$K = \frac{\hbar e Z a}{24 \pi \epsilon_0 m c^2 n_e} \int_0^\infty R_{n_l}(x) dx \times \int_0^1 \{R_{n_l}(x_1) - R_{n_l}(x_2)\} (1 - y^2) dy,$$

где  $a$  – расстояние до ближайших соседей,  $x = Zr/a_B$ ,  $b = Za/a_B$ ,  $y = \cos \theta$ ,

$$x_1 = \sqrt{x^2 + b^2 + 2xby}, \quad x_2 = \sqrt{x^2 + b^2 - 2xby}.$$

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное уравнение движения (11) демонстрирует динамический эффект управления спиновой поляризацией электронов проводимости через неоднородную деформацию металла. Полученные уравнения справедливы для широкого класса кристаллов с сильным спин-орбитальным взаимодействием, например, для платины и т.д. Эффект может найти применение в ряде разделов современной спинтроники.

Так, за последние 3 года появился ряд экспериментальных работ, в которых обнаруженные эффекты спинтроники и спинкалоритроники ещё не получили объяснения: управление направлением потока тепла магнитно-термоэлектрическим эффектом в деформированном металлическом магнетике [12], расширение температурного диапазона накачки тепла с помощью эластокалорического эффекта [13], аномальный эффект Риги-Ледюка в ферромагнитных материалах [14]. Представленный в работе динамический эффект может лечь в основу теории новых эффектов стрейнспинтроники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фетисов ЮК, Сигов АС. Спинтроника: физические основы и устройства. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2018, 10(3):343-356. DOI: 10.17725/rensit.2018.10.343.
2. Бебенин НГ. Влияние электрического тока на спиновую поляризацию электронов в материалах с неоднородной

- намагниченностью. *ЖЭТФ*, 2022, 161(5):737-745.
3. Бухараев АА, Звездин АК, Пятаков АП, Фетисов ЮК. Стрейнтроника – новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах. *УФН*, 2018, 188(12):1288-1330.
  4. Ignatiev VK, Lebedev NG, Orlov AA. Quantum model of a hysteresis in a single-domain magnetically soft ferromagnetic. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, 446:135-142.
  5. Ignatiev VK, Lebedev NG, Orlov AA, Perchenko SV. Quantum model for studying magneto-mechanical properties of a magnetically soft ferromagnet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 494:165658.
  6. Игнатъев ВК, Лебедев НГ, Станкевич ДА. Эффект управления спиновой поляризацией электронов проводимости через деформацию ферромагнетика. *Письма в ЖТФ*, 2022, 48(23):30-33.
  7. Берестецкий ВБ, Лифшиц ЕМ, Питаевский АП. *Теоретическая физика. Т. IV. Квантовая электродинамика*. М., Физматлит, 2002, 720 с.
  8. Ландау ЛД, Лифшиц ЕМ. *Теоретическая физика. Т. III. Квантовая механика. Нерелятивистская теория*. М., Физматлит, 2004, 800 с.
  9. Маделунг О. *Теория твердого тела*. М., Наука, 1980, 416 с.
  10. Кринчик ГС. *Физика магнитных явлений*. М., МГУ, 1976, 367 с.
  11. Ландау ЛД, Лифшиц ЕМ. *Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости*. М., Физ-матлит, 2003, 264 с.
  12. Ota S, Uchida K-I, Iguchi R, Thach PV, Awano H, Chiba D. Strain-induced switching of heat current direction generated by magneto-thermoelectric effects. *Scientific Reports*, 2019, 9:13197.
  13. Snodgrass R, Erickson D. A multistage elastocaloric refrigerator and heat pump with 28 K temperature span. *Scientific Reports*, 2019, 9:18532.
  14. Zhou DK, Xu QL, Yu XQ, Zhu ZG, Su G. Identification of spin effects in the anomalous Righi–Leduc effect in ferromagnetic metals. *Scientific Reports*, 2020, 10:11732.
- Игнатъев Вячеслав Константинович**  
д.ф.-м.н., профессор  
Волгоградский государственный университет  
100, просп. Университетский, Волгоград 400062, Россия  
E-mail: vkignatjev@yandex.ru
- Лебедев Николай Геннадьевич**  
д.ф.-м.н., профессор  
Волгоградский государственный университет  
100, просп. Университетский, Волгоград 400062, Россия  
E-mail: nikolay.lebedev@volsu.ru
- Перченко Сергей Владимирович**  
к.ф.-м.н. доцент  
Волгоградский государственный университет  
100, просп. Университетский, Волгоград 400062, Россия  
E-mail: perchenko@volsu.ru
- Станкевич Дмитрий Александрович**  
к.ф.-м.н., доцент  
Волгоградский государственный университет  
100, просп. Университетский, Волгоград 400062, Россия  
E-mail: dimon50002004@yandex.ru



DOI: 10.17725/rensit.2023.15.139

## Разработка АUC-диаграмм для анализа межполушарной асимметрии амплитудно-частотных характеристик ЭЭГ для выявления отсроченной ишемии головного мозга вследствие нетравматического субарахноидального кровоизлияния

<sup>1</sup>Сушкова О.С., <sup>1</sup>Морозов А.А., <sup>1</sup>Кершнер И.А., <sup>2</sup>Окунева И.В., <sup>2</sup>Синкин М.В.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>  
Москва 125009, Российская Федерация

<sup>2</sup>НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского, Отделение неотложной нейрохирургии, <https://sklif.mos.ru/>

Москва 129090, Российская Федерация

E-mail: [o.sushkova@mail.ru](mailto:o.sushkova@mail.ru), [morozov@cplire.ru](mailto:morozov@cplire.ru), [ivan.kershner@gmail.com](mailto:ivan.kershner@gmail.com), [okunevaiv@mail.ru](mailto:okunevaiv@mail.ru), [mvsinkin@gmail.com](mailto:mvsinkin@gmail.com)

Поступила 28.05.2023, рецензирована 05.06.2023, принята 12.06.2023

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** В статье описан новый вид АUC-диаграмм, предназначенный для анализа межполушарной асимметрии амплитудно-частотных характеристик электроэнцефалограмм (ЭЭГ) пациентов, перенёсших субарахноидальное кровоизлияние, а также новая разновидность карт головы – карты межполушарной асимметрии ЭЭГ. АUC-диаграммы являются новым статистическим инструментом выявления закономерностей в биомедицинских сигналах. Идея АUC-диаграмм заключается в визуальном представлении зависимости площади под ROC-кривой (area under curve, АUC) при сравнении выборок данных от границ диапазона некоторой исследуемой характеристики этих данных, например, частоты, амплитуды и др. В статье продемонстрировано, что указанный принцип анализа данных позволяет выявить некоторые признаки послеоперационных осложнений, которые могут возникать у пациентов, проходящих лечение в реанимационном отделении. Известно, что признаками таких осложнений являются изменения амплитуды и частоты колебаний ЭЭГ в нейрофизиологических диапазонах частот дельта, тета, альфа и бета, однако изменения амплитуды могут быть вызваны и другими причинами, включая состояние сна и воздействие фармакологических препаратов. Изменения амплитуды, вызванные послеоперационными осложнениями, позволяет выявить анализ межполушарной асимметрии ЭЭГ пациента. Разработанная разновидность АUC-диаграмм и карты межполушарной асимметрии ЭЭГ помогают автоматизировать такой анализ ЭЭГ. Эффективность разработанного статистического инструмента продемонстрирована на примере анализа данных двух пациентов с клинически подтверждённой отсроченной ишемией головного мозга после субарахноидального кровоизлияния.

**Ключевые слова:** АUC-диаграммы, ROC-анализ, ЭЭГ, частотные диапазоны ЭЭГ, межполушарная асимметрия, карты головы, карты межполушарной асимметрии, отсроченная ишемия, субарахноидальное кровоизлияние, биомедицинские сигналы

УДК 519.67, 612.1, 53.083, 519.24, 004.93

**Благодарности:** Авторы благодарят д.ф.-м.н. Юрия Владимировича Обухова за конструктивную критику и помощь в проведении исследований. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-69-00102, <https://rscf.ru/project/22-69-00102/>.

**Для цитирования:** Сушкова О.С., Морозов А.А., Кершнер И.А., Окунева И.В., Синкин М.В. Разработка АUC-диаграмм для анализа межполушарной асимметрии амплитудно-частотных характеристик ЭЭГ для выявления отсроченной ишемии головного мозга вследствие нетравматического субарахноидального

кровоизлияния. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):139-152. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.139.

## Development of AUC diagrams for analysis of interhemispheric asymmetry of amplitude-frequency characteristics of EEG to detect delayed cerebral ischemia induced by non-traumatic subarachnoid hemorrhage

**Olga S. Sushkova, Alexei A. Morozov, Ivan A. Kershner**

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>  
Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: [o.sushkova@mail.ru](mailto:o.sushkova@mail.ru), [morozov@cplire.ru](mailto:morozov@cplire.ru), [ivan.kershner@gmail.com](mailto:ivan.kershner@gmail.com)

**Irina V. Okuneva, Mikhail V. Sinkin**

Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Department of Emergency Neurosurgery, <https://sklif.mos.ru/>

Moscow 129090, Russian Federation

E-mail: [okunevaiv@mail.ru](mailto:okunevaiv@mail.ru), [mvsinkin@gmail.com](mailto:mvsinkin@gmail.com)

Received May 28, 2023, peer-reviewed June 5, 2023, accepted June 12, 2023

**Abstract:** The article describes a new type of AUC diagrams intended for the analysis of interhemispheric asymmetry of amplitude-frequency characteristics of electroencephalograms (EEG) of patients with subarachnoid hemorrhage, as well as a new type of head maps named maps of interhemispheric asymmetry of EEG. AUC diagrams are a new statistical tool for identifying regularities in biomedical signals. The idea of AUC diagrams is to visually represent the dependence of the area under the ROC curve (AUC) when comparing data samples from the bounds of the range of given characteristic of this data, for example, frequency or amplitude, etc. The article demonstrates that this principle of data analysis allows us to identify some signs of postoperative complications that may occur in patients undergoing intensive care unit. It is known that the signs of such complications are changes in the amplitude and frequency of EEG oscillations in the neurophysiological frequency ranges delta, theta, alpha, and beta; however, amplitude changes can be caused by other reasons including the state of sleep and exposure to pharmacological drugs. Changes in the amplitude caused by postoperative complications can be revealed by analysis of the interhemispheric asymmetry of the patient's EEG. The developed type of AUC diagrams and interhemispheric EEG asymmetry maps help to automate such EEG analysis. The effectiveness of the developed statistical tools was demonstrated by the analysis of data in two patients with clinically confirmed delayed cerebral ischemia induced by subarachnoid hemorrhage.

**Keywords:** AUC diagrams, ROC analysis, EEG, EEG frequency ranges, interhemispheric asymmetry, head maps, interhemispheric asymmetry maps, delayed cerebral ischemia, subarachnoid hemorrhage, biomedical signals

UDC 519.67, 612.1, 53.083, 519.24, 004.93

**Acknowledgments:** The authors thank Prof. Yuri Vladimirovich Obukhov for constructive criticism and assistance in research. The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-69-00102, <https://rscf.ru/en/project/22-69-00102/>.

**For citation:** Olga S. Sushkova, Alexei A. Morozov, Ivan A. Kershner, Irina V. Okuneva, Mikhail V. Sinkin Development of AUC diagrams for analysis of interhemispheric asymmetry of amplitude-frequency characteristics of EEG to detect delayed cerebral ischemia induced by non-traumatic subarachnoid hemorrhage. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2023, 15(2):139-152e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.139.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. ВВЕДЕНИЕ (141)
  2. РАЗРАБОТКА АУС-ДИАГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕЖПОЛУШАРНОЙ АСИММЕТРИИ ЭЭГ (143)
    - 2.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ЧТЕНИЯ АУС-ДИАГРАММ (143)
    - 2.2. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ МЕЖПОЛУШАРНЫХ ОТЛИЧИЙ ЭЭГ (144)
    - 2.3. ПРИМЕРЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭЭГ НОРМЫ (145)
  3. АНАЛИЗ МЕЖПОЛУШАРНОЙ АСИММЕТРИИ ЭЭГ У ПАЦИЕНТОВ С ОТСРОЧЕННОЙ ИШЕМИЕЙ (146)
    - 3.1. СБОР И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ (146)
    - 3.2. АНАЛИЗ ЭЭГ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ (147)
    - 3.3. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ЭЭГ В ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ (149)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (150)
- ЛИТЕРАТУРА (150)**

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Отсроченная ишемия головного мозга является опасным осложнением, которое может возникнуть у пациента через несколько дней после хирургического лечения по поводу нетравматического субарахноидального кровоизлияния. Отсроченная ишемия головного мозга представляет непосредственную угрозу жизни пациента. Своевременная диагностика этого осложнения является актуальной медицинской проблемой. Одним из способов диагностики отсроченной ишемии головного мозга является непрерывный мониторинг состояния пациента средствами электроэнцефалографии (ЭЭГ). В настоящее время анализ ЭЭГ осуществляется врачом. При этом автоматическое выявление признаков отсроченной ишемии по данным ЭЭГ считается открытой научной проблемой. Сложность автоматического анализа ЭЭГ заключается в том, что появление ЭЭГ-признаков данного осложнения может быть обусловлено иными причинами. Например, увеличение амплитуды ЭЭГ в частотной области дельта может происходить во время сна пациента, а признаки эпилептиформной активности легко перепутать с артефактами ЭЭГ, возникающими при жевании. Целью данной работы является создание новых статистических методов, помогающих выявить

ЭЭГ-признаки отсроченной ишемии головного мозга, и автоматизировать анализ данных непрерывного ЭЭГ-мониторинга.

Первые научные работы, показавшие связь между электрическими процессами в коре головного мозга и работой кровеносной системы, были сделаны ещё до появления электроэнцефалографии в конце 19-го века [1]. Уже тогда исследователи отмечали сложность изучаемых явлений и противоречивость результатов экспериментов на животных моделях. После изобретения ЭЭГ в 1924 году [2] были опубликованы многочисленные работы, показывающие, что ЭЭГ в различных нейрофизиологических диапазонах по-разному реагирует на изменение скорости кровотока и уровня оксигенации крови. Фундаментальные работы японских исследователей [3,4] обобщили результаты экспериментальных исследований и послужили основой для дальнейшего изучения данной области. Экспериментальные результаты, описанные в нейрофизиологической литературе, указывают на возможность диагностики отсроченной ишемии головного мозга при субарахноидальном кровоизлиянии с помощью ЭЭГ [5-13]. При этом, однако, задача клинической диагностики отсроченной ишемии отличается от задачи групповых исследований пациентов. Это обусловлено иными условиями записи ЭЭГ, приводящими к большому количеству артефактов ЭЭГ, индивидуальными особенностями пациентов и необходимостью оперативного принятия решений по изменению схемы лечения. В настоящее время ЭЭГ считается перспективным средством диагностики отсроченной ишемии, однако создание систем автоматической диагностики требует дальнейших исследований [9].

Из многочисленных закономерностей изменения ЭЭГ при отсроченной ишемии головного мозга, описанных в литературе, наибольшую известность получили увеличение амплитуды дельта-ритма и уменьшение амплитуды альфа-ритма [4-6]. Широко используется также отношение спектральной плотности мощности (СПМ) ЭЭГ в диапазонах частот дельта и альфа [14-16]. Применение отношения СПМ дельта/альфа является целесообразным при сравнении групп пациентов,

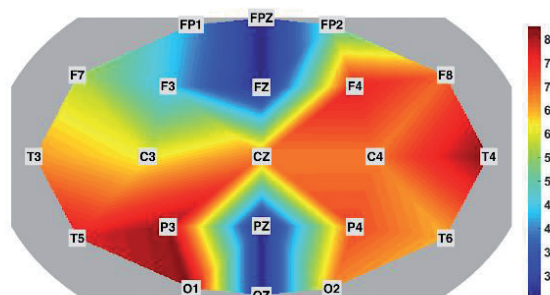


так как позволяет увеличить групповые отличия за счёт объединения в одной характеристике двух закономерностей противоположной направленности. Необходимо, однако, отметить, что задача выявления закономерностей по группам пациентов принципиально отличается от задачи клинической диагностики пациентов. Применение отношения СПМ дельта/альфа для индивидуальной диагностики пациентов может привести к ошибочным результатам, так как закономерности изменения альфа- и дельта-ритмов могут отличаться у разных пациентов. В частности, у некоторых пациентов альфа-ритм может отсутствовать, что делает отношение СПМ дельта/альфа математически некорректным.

В работах по изучению ЭЭГ при отсроченной ишемии головного мозга, в основном, осуществлялось сравнение амплитуды ЭЭГ до и после возникновения ишемии. К сожалению, в клинической практике не всегда удаётся начать ЭЭГ-мониторинг пациента сразу после проведения оперативного вмешательства. Вследствие этого врач не имеет данных ЭЭГ, с которыми можно было бы осуществить сравнение амплитуды ЭЭГ при подозрении на возникновение симптомов отсроченной ишемии, что осложняет проведение оперативной диагностики на основе закономерностей, описанных в литературе. Тем не менее, даже в этом случае для быстрой диагностики могут быть использованы признаки на основе асимметрии амплитуды ЭЭГ в поражённом и контралатеральном полушариях. Наличие межполушарных отличий ЭЭГ у пациентов с отсроченной ишемией описано в нейрофизиологической литературе [3-6].

Задача диагностики на основе данных ЭЭГ, полученных непосредственно в день начала ишемии, может быть решена с помощью визуализации межполушарных отличий ЭЭГ. Одним из средств визуального представления ЭЭГ являются "карты" головы. Обычно карта головы представляет собой двумерное изображение, на котором с помощью цветовой шкалы отображены значения амплитуды ЭЭГ в заданном диапазоне частот на всех электродах ЭЭГ (см. пример на **Рис. 1**).

Карты головы являются полезным инструментом диагностики отсроченной ишемии головного мозга, конечно, если



**Рис. 1.** Пример стандартной карты головы пациента с отсроченной ишемией головного мозга. Диапазон частот дельта (2-4 Гц). Отображаемая величина – квадратный корень медианы квадрата мгновенной амплитуды ЭЭГ за 19 часов. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На карте головы наблюдаются одновременно различные тенденции изменения ЭЭГ, а также артефакты записи ЭЭГ. Тем не менее, на основе карты головы можно сделать заключение о наличии межполушарной асимметрии ЭЭГ в частотной области дельта.

программная реализация карт головы позволяет отобразить усреднённую амплитуду ЭЭГ за достаточно длительный период времени (например, сутки). Недостатком стандартных карт головы является то, что на одном изображении смешиваются и накладываются различные тенденции изменения ЭЭГ, даже если они являются статистически независимыми. Например, на разных группах электродов могут наблюдаться разные формы межполушарной асимметрии; на карте головы будет отображена усреднённая картина амплитуды ЭЭГ за весь рассматриваемый интервал времени. Кроме того, все артефакты ЭЭГ-записи, которые могут быть весьма существенны, также накладываются на общую картину, что усложняет правильную интерпретацию данных ЭЭГ. В настоящей работе предложены статистические инструменты на основе AUC-диаграмм и метода главных компонент (МПК), позволяющие устранить указанные недостатки стандартных карт головы ЭЭГ. Идея AUC-диаграмм заключается в визуальном представлении зависимости площади под ROC-кривой (area under curve, AUC) при сравнении выборок данных от границ диапазона некоторой исследуемой характеристики этих данных, например, частоты, амплитуды и др. В статье предложена новая разновидность



АУС-диаграмм, предназначенная для выявления межполушарных отличий ЭЭГ. Метод главных компонент позволяет выделить составные части сигналов ЭЭГ, характеризующиеся согласованным изменением сигналов на некоторых группах электродов.

Ещё одной проблемой при использовании ЭЭГ для диагностики отсроченной ишемии головного мозга является выбор диапазонов частот для анализа. Дело в том, что разные авторы используют разные границы нейрофизиологических диапазонов частот дельта, тета, альфа и бета. Таким образом, объективно существует проблема определения и верификации границ диапазонов частот, в которых ожидается проявление закономерностей, описанных в литературе по диагностике отсроченной ишемии с помощью ЭЭГ. Диапазоны частот должны быть обоснованы и экспериментально подтверждены. В данной работе для этого используются АУС-диаграммы.

В статье в качестве примера проанализированы данные ЭЭГ двух пациентов с клинически подтверждённой отсроченной ишемией головного мозга после субарахноидального кровоизлияния. На картах головы у обоих пациентов наблюдается схожая картина межполушарной асимметрии ЭЭГ в частотных диапазонах дельта, тета, альфа и бета. Такая асимметрия не наблюдается у пациентов до и после отсроченной ишемии, а также у пациентов из контрольной группы.

## 2. РАЗРАБОТКА АУС-ДИАГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕЖПОЛУШАРНОЙ АСИММЕТРИИ ЭЭГ

### 2.1. Принципы построения и чтения АУС-диаграмм

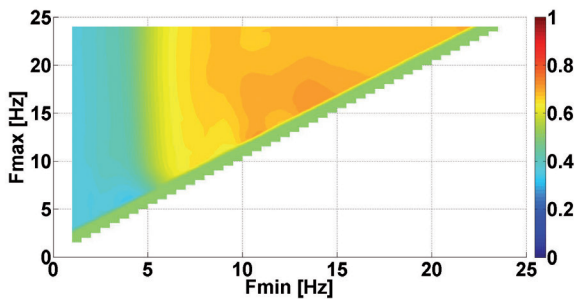
Идея АУС-диаграмм была предложена авторами для анализа всплескообразной электрической активности мозга при решении задачи диагностики нейродегенеративных заболеваний [17-21]. В данной статье метод анализа всплескообразной электрической активности не применяется, однако принципы построения и чтения АУС-диаграмм остаются теми же. ЭЭГ-запись разбивается на короткие отрезки (например, по 10 минут). Мы перебираем все возможные сочетания значений нижней и

верхней границ диапазона частот ЭЭГ. Для каждого рассматриваемого диапазона частот, для каждого отрезка ЭЭГ и каждого отведения ЭЭГ вычисляется средняя амплитуда сигнала. Для каждого рассматриваемого диапазона частот формируется матрица:

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mk} \\ b_{11} & \dots & b_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & \dots & b_{mk} \end{bmatrix},$$

где  $a_{ij}$  – значения средней амплитуды ЭЭГ в рассматриваемом диапазоне частот на отведениях левой стороны скальпа;  $b_{ij}$  – значения средней амплитуды ЭЭГ в рассматриваемом диапазоне частот на отведениях правой стороны скальпа;  $k$  – количество пар симметричных отведений ЭЭГ;  $m$  – количество коротких (10-минутных) отрезков ЭЭГ. С помощью МГК вычисляются главные компоненты матрицы  $M$ . Количество компонент соответствует количеству пар симметричных электродов. Вычисляется проекция матрицы  $M$  на главные компоненты. В результате этого получается  $k$  векторов, состоящих из  $m$  проекций значений амплитуд на левом полушарии и  $m$  проекций значений амплитуд на правом полушарии. Вычисляется ROC-кривая сравнения значений проекций амплитуд на левом и правом полушариях, соответствующих интересующей нас компоненте МГК. Вычисляется площадь под ROC-кривой (AUC). Значения AUC для всех рассматриваемых диапазонов частот для выбранной компоненты МГК изображаются в виде двумерной диаграммы (АУС-диаграммы).

На **Рис. 2** приведён пример АУС-диаграммы пациента с отсроченной ишемией после субарахноидального кровоизлияния, соответствующей первой главной компоненте МГК. Читать АУС-диаграмму целесообразно следующим образом. Рассмотрим однотонные цветовые области, прилегающие к диагонали АУС-диаграммы. На диаграмме присутствуют две большие однотонные области; одна – голубого, а другая – рыжего цветов. Точка разделения этих областей, ближайшая к диагонали, примерно соответствует частоте 6 Гц по осям абсцисс и



**Рис. 2.** Пример частотной AUC-диаграммы ЭЭГ пациента с отсроченной ишемией головного мозга. Отображаемая величина – площадь под ROC-кривой (AUC) при сравнении амплитуд фрагментов ЭЭГ (суточная запись ЭЭГ разделена на 10-минутные фрагменты) в левом и правом полушариях в диапазоне частот  $[F_{min}, F_{max}]$ , где  $F_{min}$  – нижняя граница диапазона частот, которая отложена по оси абсцисс, а  $F_{max}$  – верхняя граница диапазона частот, которая отложена по оси ординат. Рассматриваются амплитуды ЭЭГ на всех парах симметричных электродов. Чтобы свести данные всех электродов к единой величине, вычисляется проекция значений амплитуд на первую главную компоненту МГК. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На AUC-диаграмме наблюдаются две однотонные области – голубая и оранжевая. Это является следствием того, что в разных диапазонах частот у пациента наблюдаются противоположные тенденции межполушарной асимметрии ЭЭГ.

ординат. Синий и голубой цвета на диаграмме соответствуют значениям  $AUC < 0.5$ ; рыжий и жёлтый цвета соответствуют значениям  $AUC > 0.5$ . Следовательно, на частотах ниже 6 Гц средняя амплитуда ЭЭГ в левом полушарии меньше, чем в правом, а на частотах выше 6 Гц средняя амплитуда ЭЭГ, наоборот, больше в левом полушарии. Таким образом, у данного пациента наблюдается разнонаправленная межполушарная асимметрия амплитуды ЭЭГ в разных диапазонах частот, что соответствует закономерностям изменения ЭЭГ при отсроченной ишемии головного мозга, описанным в литературе.

Согласно данным, описанным в литературе, можно ожидать, что выявленная асимметрия амплитуды ЭЭГ будет по-разному проявляться на участках скальпа, соответствующих разным отведениям ЭЭГ. Представляет интерес также степень генерализации выявленных отличий амплитуды ЭЭГ. Для изучения этих вопросов

мы применяем карты межполушарной асимметрии ЭЭГ, на которых показаны значения коэффициентов МГК для разных отведений ЭЭГ.

## 2.2. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ МЕЖПОЛУШАРНЫХ ОТЛИЧИЙ ЭЭГ

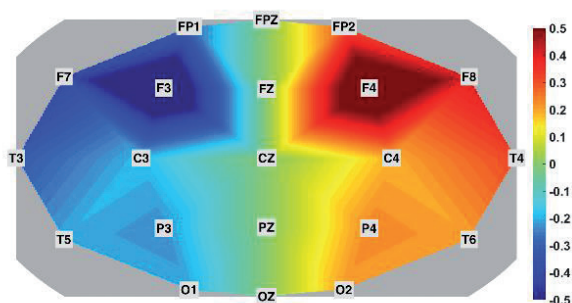
Карты межполушарной асимметрии (КМА) ЭЭГ отличаются от стандартных карт головы тем, что они отображают степень асимметрии амплитуды между соответствующими парами отведений ЭЭГ на левом и правом полушариях. Степень асимметрии отображается с помощью цветовой шкалы. Оттенками красного и жёлтого цветов обозначаются те отведения, на которых наблюдается увеличенная амплитуда ЭЭГ по сравнению с соответствующими отведениями на контралатеральном полушарии. Отведения на контралатеральном полушарии обозначаются оттенками синего и голубого цветов. КМА всегда симметрична по вертикальной оси с точностью до инверсии цветов. Это является следствием того, что при построении КМА отбрасывается информация о причине наблюдаемой асимметрии. Например, если амплитуда ЭЭГ больше нормы в правом полушарии, КМА будет выглядеть так же, как если бы амплитуда ЭЭГ была меньше нормы в левом полушарии. Это свойство КМА позволяет сосредоточить внимание на свойствах межполушарной асимметрии ЭЭГ, абстрагируясь от абсолютной величины амплитуды ЭЭГ. В случае необходимости врач может получить исчерпывающую информацию об амплитуде ЭЭГ с помощью стандартных карт головы, или непосредственно изучая сигналы ЭЭГ.

Ещё одним отличием КМА от стандартных карт головы является то, что КМА соответствует одной выбранной главной компоненте МГК. Таким образом, одной стандартной карте головы в выбранном диапазоне частот соответствуют несколько КМА. При анализе ЭЭГ пациента обычно используют лишь КМА, соответствующие первым главным компонентам МГК, отражающим наиболее существенные межполушарные отличия. К сожалению, невозможно предсказать заранее, какие именно КМА будут содержать информацию, имеющую диагностическую ценность. Дело в том, что некоторые КМА могут соответствовать

артефактам записи ЭЭГ. Такие КМА обычно легко распознать по характерному внешнему виду, что позволяет исключить из анализа влияние артефактов записи ЭЭГ и выделить информацию, важную для диагностики отсроченной ишемии.

Рассмотрим пример КМА пациента с отсроченной ишемией головного мозга (Рис. 3). Данная КМА соответствует первой компоненте МГК в нейрофизиологическом диапазоне частот дельта (2-4 Гц). На КМА наблюдается межполушарная асимметрия ЭЭГ в частотной области дельта, генерализованная по всей поверхности скальпа. В наибольшей степени межполушарные отличия наблюдаются во фронтальной области коры, в том числе, на отведениях F3 и F4. Это может быть связано с тем, что у данного пациента в области электрода F4 находится поражённый участок мозга.

Заметим, что КМА, подобные рассмотренной выше, наблюдались нами у обоих пациентов с отсроченной ишемией головного мозга. В то же время при отсутствии у пациентов отсроченной ишемии такие КМА не наблюдались. Ниже будет показано, что у данного пациента наблюдаются и другие формы межполушарной асимметрии, проявляющиеся независимо от закономерностей,



**Рис. 3.** Пример карты межполушарной асимметрии ЭЭГ пациента с отсроченной ишемией головного мозга. Диапазон частот дельта (2-4 Гц). Длина ЭЭГ записи – 19 часов. Отображаемая величина – коэффициенты **первой** главной компоненты МГК. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На КМА наблюдается межполушарная асимметрия ЭЭГ в частотной области дельта, генерализованная по всей поверхности скальпа. В наибольшей степени межполушарные отличия наблюдаются на отведениях F3 и F4.

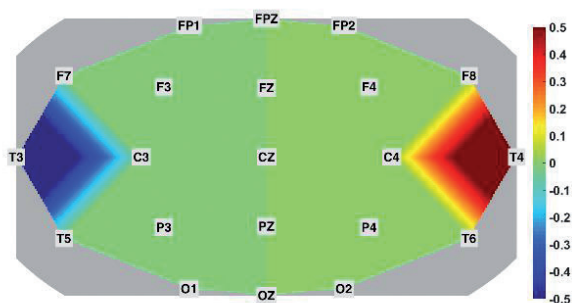
выявленных на рассмотренной КМА, то есть, соответствующие другим компонентам МГК.

КМА позволяют разделять и рассматривать по отдельности некоррелированные тенденции межполушарной асимметрии ЭЭГ. Далее будут рассмотрены характерные случаи КМА нормы (пациентов, не страдающих отсроченной ишемией).

### 2.3. ПРИМЕРЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭЭГ НОРМЫ

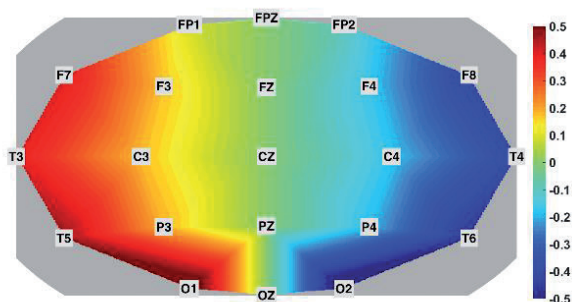
Обычно для нормы не характерно наличие межполушарной асимметрии ЭЭГ. Тем не менее, на КМА нормы, как правило, можно обнаружить различные формы асимметрии, обусловленные артефактами записи ЭЭГ. На Рис. 4 приведён пример КМА, отображающей простейший артефакт записи ЭЭГ.

Отведения T3 и T4 на КМА закрашены синим и красным цветами, соответственно. Другие отведения КМА закрашены зелёным цветом, который соответствует коэффициенту 0. Это означает, что наблюдаемые отличия между отведениями T3 и T4 никак не коррелируют с другими отведениями. Скорее всего, наблюдаемое отличие между отведениями возникло вследствие того, что пропал контакт отведения T3 с кожей пациента.



**Рис. 4.** Пример карты межполушарной асимметрии ЭЭГ нормы (пациента без отсроченной ишемии головного мозга). Диапазон частот дельта (2-4 Гц). Длина ЭЭГ записи – 32 часа. Отображаемая величина – коэффициенты **первой** главной компоненты МГК. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На КМА видно, что коэффициенты рассматриваемой компоненты МГК отличаются от 0 только на отведениях T3 и T4. Это позволяет сделать вывод о том, что наблюдаемое межполушарное отличие не генерализовано и является следствием **артефакта** записи ЭЭГ.





**Рис. 5.** Пример карты межполушарной асимметрии ЭЭГ нормы. Диапазон частот дельта (2-4 Гц). Длина ЭЭГ записи – 17 часов. Отображаемая величина – коэффициенты первой главной компоненты МГК. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На КМА наблюдается межполушарная асимметрия ЭЭГ в частотной области дельта, генерализованная по всей поверхности скальпа. В наибольшей степени межполушарные отличия наблюдаются на отведениях O1 и O2. Данный пример показывает, что наличие генерализованной межполушарной асимметрии само по себе не является признаком заболевания.

На **Рис. 5** приведён более сложный пример КМА нормы. На данной КМА, в отличие от предыдущего примера, наоборот, межполушарные отличия наблюдаются практически на всех отведениях, расположенных по краям карты. Подобные КМА отображают артефакты записи ЭЭГ, обусловленные проникновением на отведения ЭЭГ электромиографических сигналов (ЭМГ). Отведения ЭЭГ, расположенные по краям КМА, в наибольшей степени подвержены влиянию ЭМГ мышц шеи и лица. В данном случае появление наблюдаемых артефактов ЭЭГ связано с тем, что пациент в течение суток лежал, в основном, на левом боку.

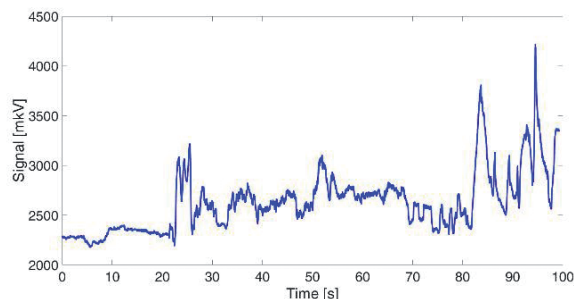
Приведённые примеры показывают, что наличие амплитудной асимметрии на КМА пациента само по себе не является признаком отсроченной ишемии головного мозга. Для постановки точного диагноза необходимо учитывать форму асимметрии ЭЭГ, а именно, взаимное расположение и размер цветных областей на КМА. Далее будут приведены примеры КМА пациентов с отсроченной ишемией в различных нейрофизиологических диапазонах частот.

### 3. АНАЛИЗ МЕЖПОЛУШАРНОЙ АСИММЕТРИИ ЭЭГ У ПАЦИЕНТОВ С ОТСРОЧЕННОЙ ИШЕМИЕЙ

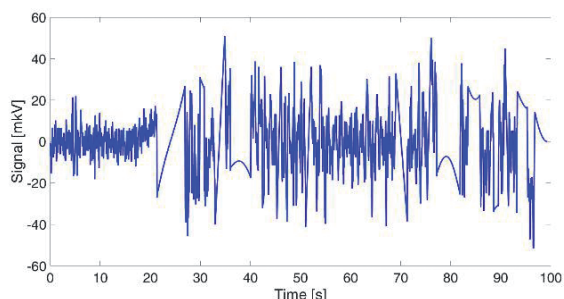
#### 3.1. СБОР И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Измерение ЭЭГ пациентов осуществлялось в отделении неотложной нейрохирургии НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского с помощью электроэнцефалографа Мицар-ЭЭГ 202. Использовались чашечковые хлорсеребряные электроды. Электроды устанавливались по стандартной системе 10-20. Всего устанавливался 21 электрод ЭЭГ. Референтный и заземляющий электроды располагали по средней линии между точками Fz и Cz. Использовали фильтр высоких частот 0.5 Гц и фильтр низких частот 70 Гц. Использовалась частота дискретизации 250 Гц.

Клинические ЭЭГ отличаются от лабораторных ЭЭГ наличием большого количества выбросов и существенным дрейфом нуля. Одним из практических способов борьбы с низким качеством ЭЭГ-сигналов в клинической практике является применение монтажа Double Vanapa. При использовании этого монтажа на экране компьютера отображается разность ЭЭГ-сигналов, измеренных на близлежащих электродах. Монтаж Double Vanapa действительно помогает снизить дрейф нуля ЭЭГ-сигналов, но количество выбросов в ЭЭГ-сигналах при этом только увеличивается, потому что в составе ЭЭГ оказываются выбросы уже не по одному, а по двум вычитаемым каналам ЭЭГ. В данной работе мы решаем проблему удаления выбросов в ЭЭГ-сигналах с помощью статистического метода X42 [22] с предварительным удалением тренда посредством медианной фильтрации. На **Рис. 6**



**Рис. 6.** Пример клинической записи ЭЭГ. Сигнал характеризуется значительным дрейфом нуля, что усложняет применение стандартных методов удаления выбросов. Ось абсцисс – время в секундах. Ось ординат – сигнал в мкВ.



**Рис. 7.** Пример клинической записи ЭЭГ после удаления выбросов с помощью статистического метода Х42 с предварительным удалением дрейфа нуля посредством медианной фильтрации. Ось абсцисс – время в секундах. Ось ординат – сигнал в мкВ.

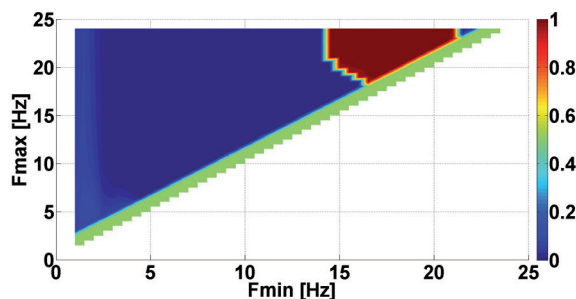
приведён пример ЭЭГ-сигнала до удаления дрейфа нуля и выбросов. На **Рис. 7** показан этот же сигнал после удаления выбросов.

В ходе построения АУС-диаграмм ЭЭГ-запись разбивается на отрезки по 10 минут. При рассмотрении различных диапазонов частот ЭЭГ-сигнал фильтруется полосовыми фильтрами Баттерворта 8-го порядка. Сигнал пропускается через фильтр в прямом, а затем в обратном направлениях для предотвращения сдвига фазы. Мгновенная амплитуда отфильтрованного ЭЭГ-сигнала вычисляется с помощью преобразования Гильберта. Вычисляется квадрат мгновенной амплитуды отфильтрованного ЭЭГ-сигнала. Вычисляется среднее значение квадрата мгновенной амплитуды. Полученная характеристика ЭЭГ-сигнала применяется для сравнения отрезков ЭЭГ и построения АУС-диаграмм. При построении матрицы  $M$  использовались 16 электродов из 21; таким образом, рассматривались 8 пар симметричных отведений ЭЭГ.

### 3.2. Анализ ЭЭГ в различных диапазонах частот

Рассмотрим примеры КМА в различных диапазонах частот. Для построения КМА будут использованы ЭЭГ-данные того же пациента с отсроченной ишемией, который рассматривался в разделах 1, 2.1 и 2.2.

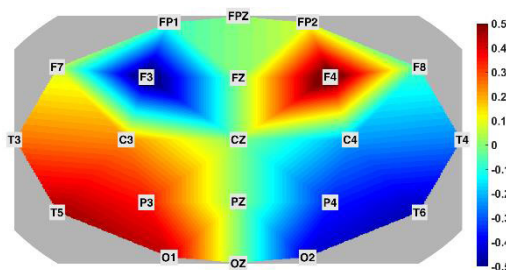
АУС-диаграмма, соответствующая первой компоненте МГК, была рассмотрена на Рис. 2. Построим АУС-диаграмму, соответствующую второй компоненте МГК. На диаграмме



**Рис. 8.** Пример частотной АУС-диаграммы ЭЭГ пациента с отсроченной ишемией головного мозга. Вычислена проекция значений амплитуд на вторую главную компоненту МГК. Отображаемая величина – площадь под ROC-кривой (АУС) при сравнении амплитуд фрагментов ЭЭГ в левом и правом полушариях. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На АУС-диаграмме наблюдается синяя область в диапазоне частот дельта 2-4 Гц.

(см. **Рис. 8**) наблюдается однотонная синяя область в диапазонах частот дельта, тета, альфа и бета. Заметим, что на АУС-диаграмме резкий переход тёмно-синего цвета в тёмно-красный в области частот выше 16 Гц является вычислительным артефактом, не влияющим на цвет соответствующих КМА.

КМА, соответствующая второй компоненте МГК в области частот дельта (2-4 Гц), приведена на **Рис. 9**. Данная КМА может рассматриваться как уточнение КМА, соответствующей первой компоненте МГК, приведённой на Рис. 3.



**Рис. 9.** Пример карты межполушарной асимметрии ЭЭГ пациента с отсроченной ишемией головного мозга. Диапазон частот дельта (2-4 Гц). Длина ЭЭГ записи – 19 часов. Отображаемая величина – коэффициенты второй главной компоненты МГК. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На КМА наблюдается межполушарная асимметрия ЭЭГ в частотной области дельта, генерализованная по всей поверхности скальпа. Наблюдается корреляция между увеличением амплитуды ЭЭГ в зоне поражения (электрод F4) и уменьшением амплитуды ЭЭГ в центральной и затылочной областях скальпа.

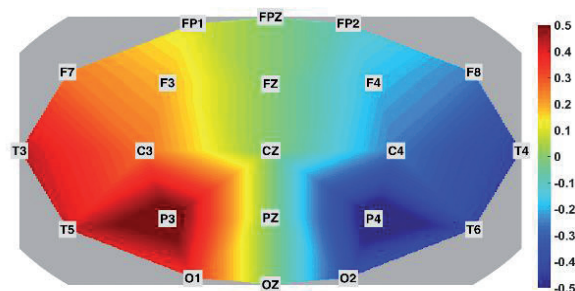
Другими словами, взаимосвязь между степенью межполушарной асимметрии на различных парах отведений не исчерпывается корреляционной зависимостью, показанной на Рис. 3. На фоне тенденции межполушарной асимметрии, изображённой на Рис. 3, существует более слабая тенденция, показанная на Рис. 9.

На КМА наблюдается корреляция между увеличением амплитуды в зоне поражения мозга (отведение F4) и уменьшением амплитуды в центральной и затылочной областях скальпа. Данная закономерность может быть объяснена тем, что увеличение амплитуды дельта-ритма в районе отведения F4 обусловлено не только признаками отсроченной ишемии, но также и наличием брешь-ритма [23]. КМА, подобные рассмотренной на Рис. 9, наблюдались нами у обоих пациентов с отсроченной ишемией головного мозга. В то же время при отсутствии у пациентов отсроченной ишемии такие КМА не наблюдались.

Далее будут рассмотрены другие диапазоны частот. AUC-диаграмма первой компоненты МГК (Рис. 2) показывает, что нейрофизиологический диапазон тета лежит на границе между диапазонами частот, в которых наблюдается межполушарная асимметрия разной направленности. Конечно, в этой ситуации мы не имеем права рассматривать стандартный диапазон тета (4-8 Гц) как единое целое. В дальнейшем мы рассматриваем верхний поддиапазон 6-8 Гц диапазона тета.

Исследование КМА в поддиапазоне тета 6-8 Гц показывает, что КМА в этом диапазоне частот отличаются более широким разнообразием, чем в диапазоне дельта. В частности, у пациентов с отсроченной ишемией на первой компоненте МГК мы наблюдали уменьшение тета-ритма в разные дни в затылочной, центральной и передней частях скальпа (см. пример на Рис. 10).

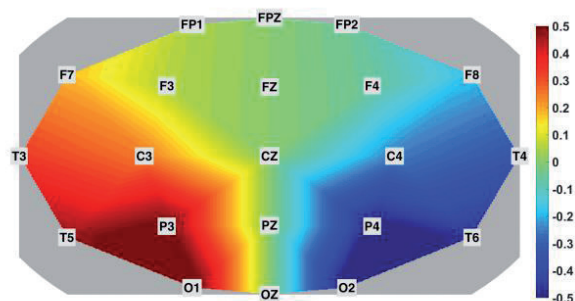
Высокая изменчивость КМА в поддиапазоне тета 6-8 Гц может быть связана с тем, что этот диапазон находится на границе диапазонов дельта и альфа, демонстрирующих противоположную направленность изменения амплитуды ЭЭГ. Существует мнение, что у пациентов с отсроченной ишемией уменьшение амплитуды альфа- и бета-ритмов может происходить позже, чем увеличение дельта-ритма [12,24]. Эта закономерность также может быть причиной



**Рис. 10.** Пример карты межполушарной асимметрии ЭЭГ пациента с отсроченной ишемией головного мозга. Поддиапазон частот тета 6-8 Гц. Длина ЭЭГ записи – 19 часов. Отображаемая величина – коэффициенты первой главной компоненты МГК. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На КМА наблюдается межполушарная асимметрия ЭЭГ, генерализованная по всей поверхности скальпа. В наибольшей степени межполушарные отличия наблюдаются в затылочной области скальпа на отведениях P3 и P4.

изменчивости КМА в поддиапазоне тета 6-8 Гц. Таким образом, КМА в диапазоне тета может содержать важную информацию о ходе заболевания, однако данный вопрос требует более детального изучения.

На КМА первой компоненты МГК в частотном диапазоне альфа (8-12 Гц) мы наблюдали уменьшение амплитуды ЭЭГ в центральной и затылочной областях скальпа на поражённом полушарии у одного пациента с отсроченной ишемией головного мозга (см. пример на Рис. 11).



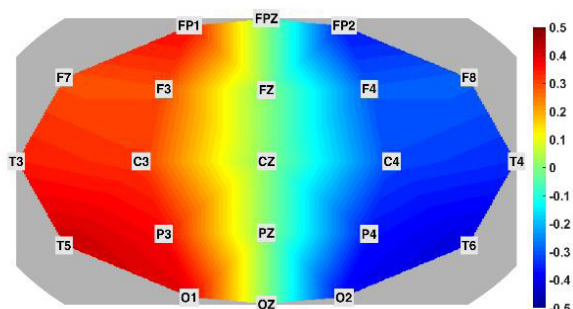
**Рис. 11.** Пример карты межполушарной асимметрии ЭЭГ пациента с отсроченной ишемией головного мозга. Диапазон частот альфа (8-12 Гц). Длина ЭЭГ записи – 19 часов. Отображаемая величина – коэффициенты первой главной компоненты МГК. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На КМА наблюдается межполушарная асимметрия ЭЭГ в частотной области альфа, генерализованная в центральной и затылочной областях скальпа.



Такая локализация межполушарной асимметрии может быть связана с тем, что источники альфа-ритма расположены в затылочной области коры, а источники мю-ритма (на тех же частотах) – в центральной области коры. У второго пациента с отсроченной ишемией также наблюдалась похожая картина изменения альфа-ритма, однако соответствующая КМА практически неотличима от КМА альфа-ритма нормы. Таким образом, КМА в частотном диапазоне альфа также несут полезную диагностическую информацию, но их применимость может оказаться более ограниченной по сравнению с КМА в диапазоне дельта.

КМА первой компоненты МГК в частотном диапазоне бета-I (13-15 Гц) у обоих пациентов с отсроченной ишемией головного мозга оказались очень похожими на КМА в частотном диапазоне альфа, поэтому для краткости изложения примеры КМА в диапазоне бета-I не приводятся.

На **Рис. 12** приведён пример КМА первой компоненты МГК в частотном диапазоне бета-II (17-24 Гц). Наблюдаемые отличия на КМА в диапазоне бета-II от КМА в диапазоне альфа можно объяснить тем, что источники бета-ритма в коре мозга не имеют чёткой локализации. КМА, подобные рассмотренной на Рис. 12, наблюдались нами у обоих пациентов с отсроченной ишемией головного мозга. В то же время, при отсутствии у пациентов отсроченной ишемии, такие КМА не наблюдались.



**Рис. 12.** Пример карты межполушарной асимметрии ЭЭГ пациента с отсроченной ишемией головного мозга. Диапазон частот бета-II (17-24 Гц). Длина ЭЭГ записи – 19 часов. Отображаемая величина – коэффициенты первой главной компоненты МГК. Величина обозначена с помощью цветовой шкалы. На КМА наблюдается межполушарная асимметрия ЭЭГ в частотной области бета-II, генерализованная по всей поверхности скальпа.

Таким образом, все рассмотренные нейрофизиологические диапазоны частот дельта, тета, альфа и бета содержат информацию о ходе заболевания, однако диагностическая ценность разных диапазонов частот неодинакова. Далее результаты анализа межполушарной асимметрии ЭЭГ в различных диапазонах частот будут сопоставлены с данными, описанными в литературе.

### 3.3. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ЭЭГ В ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ

В работах по изучению ЭЭГ при отсроченной ишемии головного мозга, в основном, описываются изменения спектральной плотности мощности ЭЭГ в различных диапазонах частот во времени. Другими словами, осуществляется сравнение ЭЭГ до и после наступления отсроченной ишемии [4-6]. В отличие от этих работ, мы сравниваем ЭЭГ в полушариях мозга непосредственно во время протекания отсроченной ишемии. Тем не менее, результаты исследований могут быть сопоставлены, так как изменения СПМ во времени по-разному проявляются в поражённом и контралатеральном полушариях [3,25-28].

Разные авторы придерживаются различных мнений о том, какие нейрофизиологические диапазоны ЭЭГ имеют наибольшую диагностическую ценность. Например, в работе [29] показано, что для ранней диагностики отсроченной ишемии мозга (за 2-3 дня) наибольшую диагностическую ценность имеют диапазоны тета и альфа; в качестве признака данного осложнения рассматривалось 40% очаговое снижение амплитуды ЭЭГ в этих диапазонах частот в течение 5-6 часов. В работе [29] отмечается важность удаления артефактов ЭЭГ и выделения очаговых изменений ЭЭГ на фоне региональных изменений ЭЭГ, вызванных различными состояниями бодрствованиями и приёмом лекарственных средств. Отличием нашего подхода к анализу ЭЭГ является использование КМА для выявления межполушарной асимметрии, вызванной фокальными (очаговыми) изменениями ЭЭГ, а также МГК для разделения некоррелированных очаговых и региональных изменений ЭЭГ. Кроме того, мы используем

AUC-диаграммы для уточнения границ диапазонов частот ЭЭГ. В большинстве работ, включая [29], такая проверка не проводится, в результате чего диагностика осуществляется с использованием некорректных границ диапазона тета, попадающего одновременно в области повышения и понижения амплитуды ЭЭГ. Данный факт позволяет объяснить противоречивые данные об изменениях амплитуды ЭЭГ в диапазоне тета, приводимые в литературе [4,5].

В работе [30] показано, что межполушарная асимметрия ЭЭГ в диапазоне дельта проявляется по-разному в зависимости от степени поражения коры и подкорковых структур мозга. Таким образом, ЭЭГ в диапазоне дельта может содержать дополнительную информацию, полезную для диагностики состояния пациента. При использовании КМА для анализа ЭЭГ в диапазоне дельта мы исходили, прежде всего, из необходимости выделения диагностически полезной информации на фоне изменений дельта-волн, возникающих в состоянии сна. КМА позволяют абстрагироваться от изменений ЭЭГ в состоянии сна, так как, в основном, они проявляются одновременно на обоих полушариях мозга.

Исследование более коротких интервалов времени (1 час) показывает, что на ЭЭГ пациентов с отсроченной ишемией на некоторых интервалах времени наблюдаются КМА, подобные КМА суточных записей, рассмотренных в данной статье, однако определение минимальных интервалов времени, достаточных для точной диагностики отсроченной ишемии, требует дополнительных исследований. Рассмотренные в статье примеры пациентов с отсроченной ишемией головного мозга ни в коем случае не позволяют сделать выводы о чувствительности и специфичности наблюдаемых карт межполушарной асимметрии в отношении данного заболевания. Мы можем лишь сделать вывод о том, что разработанный инструмент визуализации ЭЭГ-данных позволяет выявлять закономерности асимметрии ЭЭГ, ожидаемые с точки зрения современных представлений о нейрофизиологических механизмах рассматриваемого заболевания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый вид карт головы – карты межполушарной асимметрии ЭЭГ, предназначенные для выявления признаков отсроченной ишемии головного мозга после субарахноидального кровоизлияния. Для проверки границ диапазонов частот ЭЭГ, в которых осуществляется анализ, разработан новый вид AUC-диаграмм. С помощью AUC-диаграмм показано, что стандартный нейрофизиологический диапазон тета находится на границе между диапазонами частот, в которых наблюдаются изменения амплитуды ЭЭГ в противоположных направлениях, что позволяет объяснить противоречивые данные, приводимые в литературе. КМА позволяют выявлять межполушарную асимметрию, вызванную фокальными изменениями ЭЭГ, при этом МГК используется для разделения некоррелированных очаговых и региональных изменений ЭЭГ. Принципы построения и чтения КМА и AUC-диаграмм продемонстрированы на примере анализа данных двух пациентов с клинически подтвержденной отсроченной ишемией головного мозга после субарахноидального кровоизлияния. Продемонстрированы изменения ЭЭГ в диапазонах частот дельта, тета, альфа и бета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Roy CS, Sherrington CS. On the regulation of the blood-supply of the brain. *The Journal of physiology*, 1890, 11(1-2):85.
2. Berger H. Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. XIV [The electroencephalogram of man. XIV]. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 1938, 108:407-431.
3. Nagata K, Mizukami M, Araki G, Kawase T, Hirano M. Topographic electroencephalographic study of cerebral infarction using computed mapping of the EEG. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 1982, 2(1):79-88.
4. Nagata K, Tagawa K, Hiroi S, Shishido F, Uemura K. Electroencephalographic correlates of blood flow and oxygen metabolism provided by positron emission tomography in patients with cerebral infarction. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 1989, 72(1):16-30.

5. Vespa PM, Nuwer MR, Juhász C, Alexander M, Nenov V, Martin N, Becker DP. Early detection of vasospasm after acute subarachnoid hemorrhage using continuous EEG ICU monitoring. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 1997, 103(6):607-615.
6. Claassen J, Hirsch LJ, Kreiter KT, Du EY, Connolly ES, Emerson RG, Mayer SA. Quantitative continuous EEG for detecting delayed cerebral ischemia in patients with poor-grade subarachnoid hemorrhage. *Clinical neurophysiology*, 2004, 115(12):2699-2710.
7. Finnigan SP, Rose SE, Walsh M, Griffin M, Janke AL, McMahon KL, Gillies R, Strudwick MW, Pettigrew CM, Semple J, Brown J. Correlation of quantitative EEG in acute ischemic stroke with 30-day NIHSS score: comparison with diffusion and perfusion MRI. *Stroke*, 2004, 35(4):899-903.
8. Tabaeizadeh M, Aboul Nour H, Shoukat M, Sun H, Jin J, Javed F, Kassa S, Edhi M, Bordbar E, Gallagher J, Moura VJ. Burden of epileptiform activity predicts discharge neurologic outcomes in severe acute ischemic stroke. *Neurocritical care*, 2020, 32:697-706.
9. Baang HY, Chen HY, Herman AL, Gilmore EJ, Hirsch LJ, Sheth KN, Petersen NH, Zafar SF, Rosenthal ES, Westover MB, Kim JA. The utility of quantitative EEG in detecting delayed cerebral ischemia after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2022, 39(3):207-215.
10. van Putten MJ, Hofmeijer J. EEG monitoring in cerebral ischemia: basic concepts and clinical applications. *Journal of clinical neurophysiology*, 2016, 33(3):203-210.
11. van Putten MJ, Tavy DLJ. Continuous quantitative EEG monitoring in hemispheric stroke patients using the brain symmetry index. *Stroke*, 2004, 35(11):2489-2492.
12. Gavaret M, Marchi A, Lefaucheur JP. Clinical neurophysiology of stroke. *Handbook of Clinical Neurology*, 2019, 161:109-119.
13. Ajčević M, Furlanis G, Miladinović A, Buoite Stella A, Caruso P, Ukmar M, Cova MA, Naccarato M, Accardo A, Manganotti P. Early EEG alterations correlate with CTP hypoperfused volumes and neurological deficit: a wireless EEG study in hyper-acute ischemic stroke. *Annals of Biomedical Engineering*, 2021, 49(9):2150-2158; doi: 10.1007/s10439-021-02735-w.
14. Scherschinski L, Catapano JS, Karahalios K, Koester SW, Benner D, Winkler EA, Graffeo CS, Srinivasan VM, Jha RM, Jadhav AP, Ducruet AF. Electroencephalography for detection of vasospasm and delayed cerebral ischemia in aneurysmal subarachnoid hemorrhage: a retrospective analysis and systematic review. *Neurosurgical focus*, 2022, 52(3):E3.
15. Zheng WL, Kim JA, Elmer J, Zafar SF, Ghanta M, Junior VM, Patel A, Rosenthal E, Westover MB. Automated EEG-based prediction of delayed cerebral ischemia after subarachnoid hemorrhage. *Clinical Neurophysiology*, 2022, 143:97-106.
16. Yu Z, Wen D, Zheng J, Guo R, Li H, You C, Ma L. Predictive accuracy of alpha-delta ratio on quantitative electroencephalography for delayed cerebral ischemia in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage: meta-analysis. *World neurosurgery*, 2019, 126:e510-e516.
17. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV. Data mining in EEG wave trains in early stages of Parkinson's disease. *Advances in Soft Computing: 15th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2016, Cancún, Mexico, October 23-28, 2016, Proceedings, Part II 15*, Springer International Publishing, 2017:403-412.
18. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Karabanov AV. Application of brain electrical activity burst analysis method for detection of EEG characteristics in the early stage of Parkinson's disease. *Zhurnal Nevrologii i Psikiatrii imeni S.S. Korsakova*, 2018, 118(7):45-48.
19. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Karabanov AV. Investigation of surface EMG and acceleration signals of limbs' tremor in Parkinson's disease patients using the method of electrical activity analysis based on wave trains. *Advances in Artificial Intelligence – IBERAMILA 2018: 16th Ibero-American Conference on AI*, Trujillo, Peru, November 13-16, 2018, *Proceedings 16*, Springer International Publishing, 2018: 253-264.
20. Sushkova OS, Morozov AA, Gabova AV, Karabanov AV, Illarioshkin SN. A Statistical Method for Exploratory Data Analysis Based on 2D and 3D Area under Curve Diagrams: Parkinson's Disease Investigation. *Sensors*, 2021, 21(14):4700.



21. Sushkova OS, Morozov AA, Kershner IA, Khokhlova MN, Gabova AV, Karabanov AV, Chigaleichick LA, Illarioshkin SN. Investigation of Phase Shifts Using AUC Diagrams: Application to Differential Diagnosis of Parkinson's Disease and Essential Tremor. *Sensors*, 2023, 23(3):1531.
22. Hampel FR, Ronchetti EM, Rousseeuw P, Stahel WA. *Robust statistics: the approach based on influence functions*. New York, Wiley-Interscience, 1986.
23. Mironov MB, Burd SG, Kukina NV, Rubleva YuV, Kordonskaya GG, Senko IV, Yurchenko AV, Bogomazova MA, Tairova RT, Dzhabrailova KhA. Breach-rhythm. *Epilepsy and paroxysmal conditions*, 2021, 13(2):140-146.
24. Hahn CD, Wusthoff CJ (eds.). *Neuromonitoring in Neonatal and Pediatric Critical Care*, Cambridge University Press, 2022.
25. Green RL, Wilson WP. Asymmetries of beta activity in epilepsy, brain tumor, and cerebrovascular disease. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1961, 13(1):75-78.
26. LaRoche SM, Haider HA (eds.). *Handbook of ICU EEG monitoring*, Springer Publishing Company, 2018.
27. Nurfirdausi AF, Apsari RA, Wijaya SK, Prajitno P, Ibrahim N. Wavelet Decomposition and Feedforward Neural Network for Classification of Acute Ischemic Stroke based on Electroencephalography. *International Journal of Technology*, 2022, 13(8):1745-1754.
28. Koziolkin OA, Kuznietsov AA. Electroencephalographic criteria of the functional outcome prognosis in the acute period of spontaneous supratentorial intracerebral hemorrhage. *Zaporozhye Medical Journal*, 2020, 22(5):604-610. DOI: 10.14739/2310-1210.2020.5.214759.
29. Gollwitzer S, Groemer T, Rampp S, Hagge M, Olmes D, Huttner HB, Schwab S, Madžar D, Hopfengaertner R, Hamer HM. Early prediction of delayed cerebral ischemia in subarachnoid hemorrhage based on quantitative EEG: a prospective study in adults. *Clinical Neurophysiology*, 2015, 126(8):1514-1523.
30. Fanciullacci C, Bertolucci F, Lamola G, Panarese A, Artoni F, Micera S, Rossi B, Chisari C. Delta power is higher and more symmetrical in ischemic stroke patients with cortical involvement. *Frontiers in human neuroscience*, 2017, 11:385.

**Сушкова Ольга Сергеевна**

к.т.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
11-7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия  
o.sushkova@mail.ru

**Морозов Алексей Александрович**

к.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
11-7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия  
morozov@cplire.ru

**Кершнер Иван Андреевич**

м.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
11-7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия  
ivan.kershner@gmail.com

**Окунева Ирина Владимировна**

н.с.

НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского,  
Отделение неотложной нейрохирургии  
3, Б. Сухаревская площадь, Москва 129090, Россия  
okunevaiv@mail.ru

**Синкин Михаил Владимирович**

д.м.н., в.н.с.

НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского,  
Отделение неотложной нейрохирургии  
3, Б. Сухаревская площадь, Москва 129090, Россия  
mvsinkin@gmail.com.

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.153

## Получение частиц диоксида титана (рутила) на поверхности восстановленного оксида графена в сверхкритическом изопропанол

<sup>1</sup>Грошкова Ю.А., <sup>2</sup>Краевский С.В., <sup>3</sup>Буслаева Е.Ю.

<sup>1</sup>НПО "ГРАФЕНИКА", <http://www.akkolab.ru/>

Москва 107143, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины им. акад. Ю.М. Лопухина, <http://rcpcm.org/>

Москва 119435, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, <http://www.igic.ras.ru/>

Москва 119090, Российская Федерация

*E-mail: JuliaGroshkova@yandex.ru, kraevskii@mail.ru, buslaeva@igic.ras.ru*

*Поступила в редакцию 20.06.2023, рецензирована 23.06.2023, принята 25.06.2023*

**Аннотация:** Описан последовательный синтез наночастиц диоксида титана (полиморфная модификация рутил) на восстановленном оксиде графена в сверхкритическом изопропанол. При этом восстанавливался лишь оксид графена до восстановленного оксида графена. Разработан также одноступенчатый метод (one-pot) получения частиц рутила на восстановленном оксиде графена, где сверхкритический изопропанол являлся восстановителем оксида графена и средой проведения реакции. Полученные композиты исследованы с помощью методов рентгенофазового анализа, просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой спектроскопии.

**Ключевые слова:** диоксиды титана, рутил, оксид графена, восстановленный оксид графена

**УДК 546.2+546.7+546.05**

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН.

**Для цитирования:** Грошкова Ю.А., Краевский С.В., Буслаева Е.Ю. Получение частиц диоксида титана (рутила) на поверхности восстановленного оксида графена в сверхкритическом изопропанол. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):153-160. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.153.

## Obtaining of titanium dioxide (rutile) particles on the surface of reduced graphene oxide in supercritical isopropanol

**Yulia A. Groshkova**

Scientific and Production Association "GRAFENIKA", <http://www.akkolab.ru/>

Moscow 107143, Russian Federation

*E-mail: JuliaGroshkova@yandex.ru*

**Sergey V. Kraevskii**

Lopukhin Federal Research and Clinical Center of Physical-Chemical Medicine of Federal Medical-Biological Agency of Russia, <http://rcpcm.org/>

Moscow 119435, Russian Federation

*E-mail: kraevskii@mail.ru*

**Elena Yu. Buslaeva**

Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS, <http://www.igic.ras.ru/>

Moscow 119090, Russian Federation

*E-mail: buslaeva@igic.ras.ru*

*Received June 20, 2023, peer-reviewed June 23, 2023, accepted June 25, 2023*

**Abstract:** Sequential synthesis of rutile modification titanium oxide particles on reduced graphene oxide in supercritical isopropanol is described. In this case, only graphene oxide was reduced to reduced graphene oxide. A one-stage method (one-pot) was also developed for the preparation of rutile particles on reduced graphene oxide, where supercritical isopropanol was the graphene oxide reducing agent and the reaction medium. The resulting composites were studied using X-ray phase analysis, transmission electron microscopy, and atomic force spectroscopy methods.

**Keywords:** titanium dioxides, rutile, graphene oxide, reduced graphene oxide

**UDC 546.2+546.7+546.05**

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state task of Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS.

**For citation:** Yulia A. Groshkova, Sergey V. Kraevskii, Elena Yu. Buslaeva. Obtaining of titanium dioxide (rutile) particles on the surface of reduced graphene oxide in supercritical isopropanol. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology*, 2023, 15(2):153-160e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.153.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (154)
  2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ (154)
    - 2.1. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ РУТИЛА (154)
    - 2.2. ПОЛУЧЕНИЕ ОКСИДА ГРАФЕНА И ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА (155)
    - 2.3. ОСАЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ РУТИЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДА ГРАФЕНА (I МЕТОД) (155)
    - 2.4. ПОЛУЧЕНИЕ ЧАСТИЦ РУТИЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА (II МЕТОД ИЛИ МЕТОД ONE-POT) (155)
  3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (155)
    - 3.1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (155)
      - 3.1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ОГ И ВОГ (156)
    - 3.2. ОСАЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ РУТИЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДА ГРАФЕНА (157)
    - 3.3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ (157)
  4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (159)
- ЛИТЕРАТУРА (160)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Работы по синтезу соединений графена и исследованию его уникальных физических свойств образуют одно из самых перспективных направлений химии и физики новых неорганических функциональных материалов [1-3]. Одним из важных разделов этих направлений является получение композитов оксидов металлов и металлов на поверхности восстановленного оксида графена (ВОГ) [4,5]. Особенно привлекательны для использования оказались композиты на основе ВОГ и оксидов титана. И ряд этих композитов уже успешно

используются. [6-8] Работы нацелены на скорейшее получение практического результата. Однако выбор методов синтеза как наночастиц диоксида титана, так и ВОГ достаточно случаен. Нередко используются для синтеза оксида титана, как и для получения ВОГ, многоступенчатые методы, токсичные вещества [9]. Однако работ по синтезу композитов рутила на ВОГ практически нет.

В настоящей работе разработаны два универсальных, легких метода синтеза наночастиц  $\text{TiO}_2$  (полиморфная модификация рутил) на ВОГ с использованием нетоксичного реагента – сверхкритического изopropanола.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных реагентов использовали природный графит (степень чистоты 99.9%, Китай), изопропоксид титана  $\text{Ti}(\text{OCH}(\text{CH}_3)_2)_4$  (Titan(IV)-isopropylat, 98%, CAS:546-68-9), изopropanол  $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}\cdot\text{OCH}$ , гексан ЧДА, этанол  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}\cdot\text{OCH}$  ТУ 2632-011-29483781-09, гексан ЧДА.

### 2.1. ПОЛУЧЕНИЕ ЧАСТИЦ $\text{TiO}_2$ (РУТИЛ)

Частицы рутила получали гидролизом изопропаксида титана [10]. Был приготовлен раствор из 5 мл изопропаксида титана и 15 мл изopropanола. В этот раствор была добавлена дистиллированная вода (250 мл). Раствор перемешивался при комнатной температуре в течение 30 мин. Затем полученный раствор разлили по чашкам Петри и поставили в сушильный шкаф при  $95^\circ\text{C}$  на 19 ч.



Объем раствора уменьшился наполовину и полученный раствор диспергировали при помощи мощного ультразвука (параметры: частота – 20.4 кГц, удельная мощность – 0.1-1 Вт/см<sup>3</sup>), в течение 25 мин. После охлаждения центрифугировали с гексаном при 8000 об/мин по 25 мин. Сушили несколько часов при 80°C, а затем полученный порошок промывали этанолом (3 раза). Порошок прокачивали при 800°C 2 ч. для получения рутила.

## 2.2. ПОЛУЧЕНИЕ ОКСИДА ГРАФЕНА И ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА

Оксид графена (ОГ) получали модифицированным методом Хаммерса [11], путем последовательно окисления кислот природного графита кислотами с последующей промывкой до нейтрального pH и ультразвуковой обработкой (частота – 20.4 кГц, удельная мощность – 0.1-1 Вт/см<sup>3</sup>), в течение 30 мин до получения стабильной дисперсии темно-коричневого цвета с концентрацией  $c = 1$  мг/мл. Часть дисперсии ОГ сушили до постоянного веса и полученный порошок темно-серого цвета восстанавливали в сверхкритическом изопропиловом спирте, используя автоклав малого объема, изготовленный из сплавов никеля ЭП-943 [12].

## 2.3. ОСАЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ РУТИЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДА ГРАФЕНА (I МЕТОД)

К 0.01 г TiO<sub>2</sub>-рутила добавили 0.1 г ОГ и 5.8 мл C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH, смесь обрабатывали ультразвуком в течение 20 мин. Раствор переливали в кварцевый контейнер и помещали в автоклав, который находится в воздушном термостате при 285°C в течение 24 ч для восстановления в сверхкритическом изопропанол. Полученный осадок черного цвета промывали C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH и C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в соотношении 1:1 несколько раз при помощи центрифуги при 6000 об/мин в течение 10 мин, после этого материал сушили при комнатной температуре до постоянного веса. Состав и строение композитов рутила на поверхности чешуек ВОГ были исследованы комплексом физико-химических методов анализа – рентгено-фазовым анализом, атомно-силовой спектроскопией и просвечивающей электронной микроскопией.

## 2.4. ПОЛУЧЕНИЕ ЧАСТИЦ РУТИЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА (II МЕТОД ИЛИ МЕТОД ONE-POT)

К 5 мл Ti(OCH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)<sub>4</sub> (в 15 мл C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH) добавляли порционно ранее подготовленную дисперсию оксида графена, обработанную ультразвуком в течение 20 мин, при интенсивном перемешивании на магнитной мешалке. После чего добавляли 250 мл деионизированной воды, перемешивая 30 мин и высушивали при 65°C 19 часов. Полученный порошок помещали в вакуумную печь при 100°C на 3 часа, с последующим отжигом при 800°C для получения рутила на поверхности ВОГ в течение 4 часов. Полученный порошок промывали C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>OH и C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O в соотношении 1:1 при помощи центрифуги при 6000 об/мин в течение 10 мин, после чего материал сушили при комнатной температуре до постоянного веса. Далее полученные образцы были исследованы физико-химическими методами анализа.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для характеристики частиц рутила, а также композитов ОГ-частицы рутила и ВОГ-частицы рутила, использовали комплекс методов: рентгенофазовый анализ (РФА), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Размеры и форма наночастиц в дисперсии в органическом растворителе и в нанокompозитах определены путем аналитической обработки изображений микрофотографий, полученных методом ПЭМ на установке JEOL JEM-2100, при ускоряющем напряжении 100 кВ и 150 кВ, соответственно.

Перед съемкой образцы помещали на покрытые полимерной пленкой медные сетки диаметром 3.05 мм. Изображения в просвечивающем режиме получали при увеличениях до 500000x, при получении изображений электронной дифракции применяли ограничивающую диаграмму диаметром 0.4 мкм.

Для определения в электронном микроскопе межплоскостного расстояния по рефлексам дифракционной картины применялось соотношение  $\lambda L = Rd$ . Длина

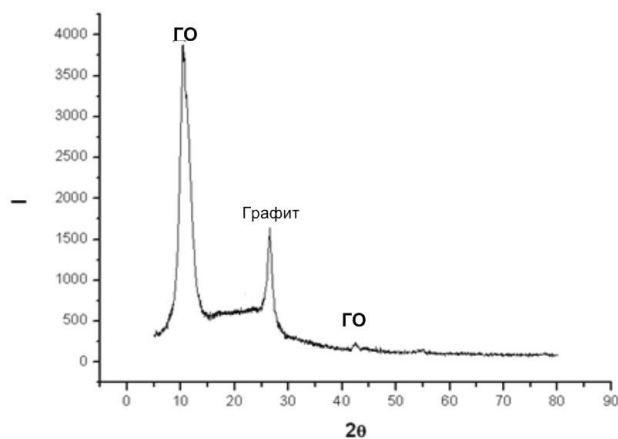
камеры в электронном микроскопе была определена прохождением электронов через все линзы.

АСМ измерения производились на воздухе с помощью микроскопа Nanoscope III (Digital Instruments), оснащенного 150 мкм сканером в таппинг и контактном режимах. В работе использовались коммерческие бесконтактные кремневые кантиллеверы с жесткостью 11.5 Н/м и резонансной частотой в пределах 193-325 кГц. Жесткость использованных контактных кантиллеверов была 0.01 или 0.3 Н/м. Частота сканирования около 2 Гц. Все АСМ изображения записывались одновременно по двум каналам: по высоте и по отклонению (для контактного режима) или по высоте и по амплитуде (для таппинг режима). Обработка изображения производилась с помощью программы ФемтоСкан (Filonov A.S. et al., 2001).

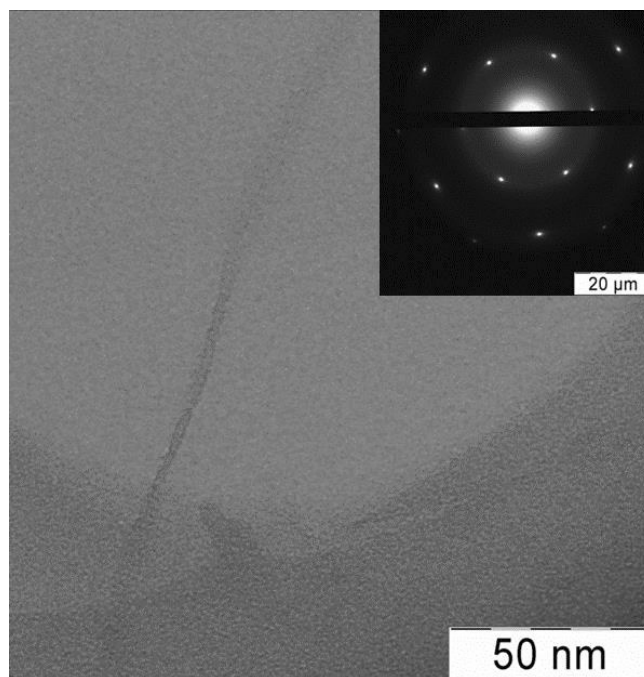
Приготовленные в ИОНХе частицы порошка разбавлялись дистиллированной водой. Полученная суспензия встряхивалась и из неё отбирали 20 мкл для нанесения на свежий скол слюды, которую использовали в качестве подложки. Полученные образцы высушивались в струе азота.

### 3.1.2. Исследование полученных ОГ и ВОГ

На **Рис. 1** представлена рентгенограмма ОГ. Результаты рентгенофазового анализа показали наличие одной фазы ОГ, для которого характерно наличие двух пиков: пик при  $13^\circ$  обладает высокой интенсивностью, а пик при  $43^\circ$  – значительно менее выражен. Пик при  $28^\circ$  соответствует пику графита.



**Рис. 1.** Рентгенограмма оксида графена.



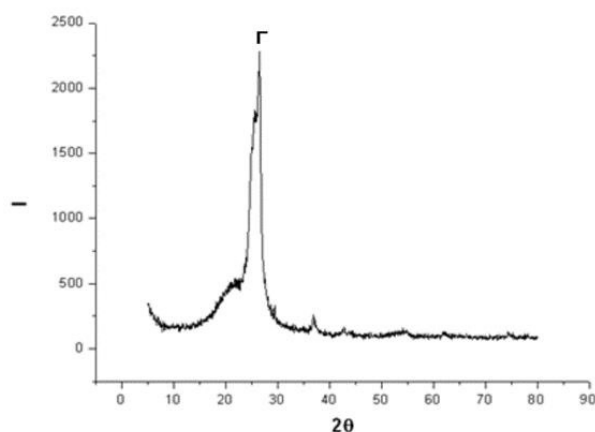
**Рис. 2.** Микрофотография оксида графена.

Представленная микрофотография ПЭМ (**Рис. 2**) относится к ОГ.

На **Рис. 3** представлен результат рентгенофазового анализа ВОГ. Известно, что пик ВОГ похож на пик графита, но при этом смещен на  $2^\circ$ , т.е. пик относящийся к ВОГ составляет  $26^\circ$ , как показано на изображении.

Вначале был получен оксид графена, после помещения ОГ в СКИ произошло успешное восстановление и был получен полностью восстановленный графен (ВОГ) с одним пиком при  $26^\circ$ . Это можно увидеть на рентгенограмме (**Рис. 3**).

На **Рис. 4** представлена микрофотография ПЭМ ВОГ после СКИ.



**Рис. 3.** Рентгенограмма ВОГ.

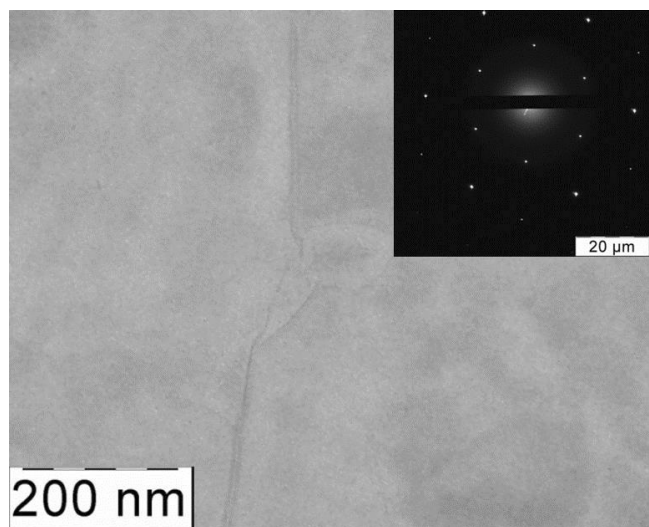


Рис. 4. Микрофотография ВОГ.

**3.2. ОСАЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ РУТИЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДА ГРАФЕНА**

К 0.01 г оксида титана (рутила) добавили ОГ (0.1 г) и изопропанол C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>ОН (5.8 мл), смесь обрабатывали ультразвуком (частота 20.4 кГц, удельная мощность 0.1-1 Вт/см<sup>3</sup>) в течение 20 мин. Полученный кристаллический рутил (0.069 гр) смешали с оксидом графена (0.135 гр) и изопропанолом (5.8 мл). Полученный раствор перелили в кварцевый контейнер и поместили в автоклав малого объема для восстановления в СКИ.

Для проведения опыта использовались автоклавы малого объема, изготовленные из сплавов никеля ЭП-943 [13]. В автоклав помещался кварцевый контейнер, содержащий дисперсию диоксида титана, ОГ и изопропанола. Автоклав в свою очередь, помещается в воздушный термостат, и выдерживался при заданной температуре необходимое время (время в сверхкритике 18 часов, температуры 280-285°C). Полученные осадки черного цвета редиспергировали в изопропанол при помощи центрифуги при 6000 об/мин 3 раза. После этого порошки высушили при комнатной температуре до постоянного веса. Далее полученные осадки черного цвета промывали изопропанолом и ацетоном в соотношении 1:1 несколько раз, центрифугировали при 6000 об/мин в течение 10 минут, после этого материал сушили при комнатной температуре до постоянного веса. Состав и строение композитов рутила на поверхности чешуек ВОГ исследовали

комплексом методов РФА, АСМ, ПЭМ.

Частицы рутила на поверхности ОГ получили с использованием изопропанола в качестве среды. Выбор изопропанола в качестве растворителя был обусловлен тем, что синтез наночастиц в нем сравнительно легко контролируем, воспроизводим и позволяет получать частицы определенных размеров. Кроме того, этот растворитель препятствует агломерации частиц за счет взаимодействия функциональных –ОН – групп с поверхностью частиц TiO<sub>2</sub>.

**3.3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ**

Для характеристики частиц оксидов титана, а также композитов ОГ-рутил и ВОГ-частицы рутила использовали комплекс методов: рентгено-фазовый анализ (РФА), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Анализ рентгенограммы рутила, представленный на Рис. 5, показал наличие одной фазы TiO<sub>2</sub> (JCPDS # 86-0147, тетрагональная, примитивная пространственная группа P<sub>4</sub>/mm, a = 4.594 Å, c = 2.958 Å). Рефлексы на дифрактограмме сужены, что свидетельствует о больших размерах исследуемых частиц. Расчет по формуле Дебая-Шерера показал, что средний размер частиц рутила составляют около 170-180 нм.

На Рис. 6 представлено электронно-микроскопическое изображение частиц TiO<sub>2</sub> (рутил), из которого видно, что исследуемый образец имеет близкую к сферической форму,

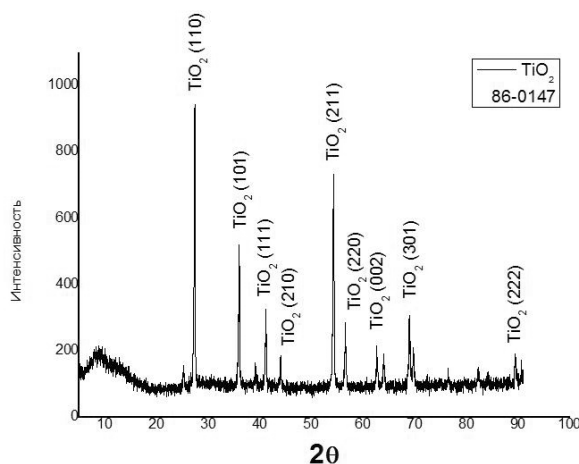
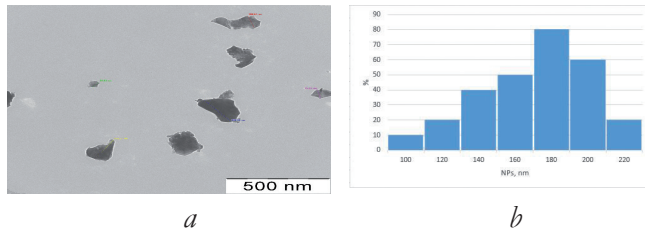


Рис. 5. Рентгенограмма частиц TiO<sub>2</sub> (рутил).





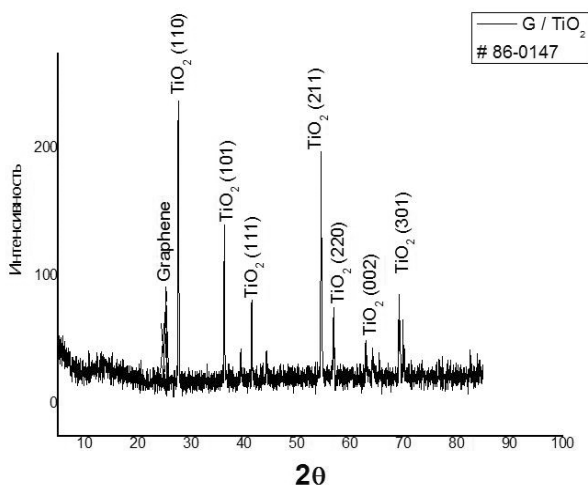
**Рис. 6.** а) микрофотография частиц рутила, б) гистограмма распределения по размерам.

а также обладает узким распределением по размерам для совокупности более 100 частиц. Гистограмма распределения по размерам показала, что средний размер НЧ составляет 180 нм.

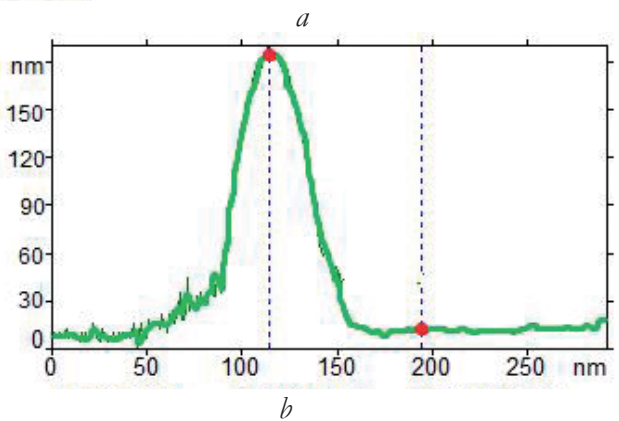
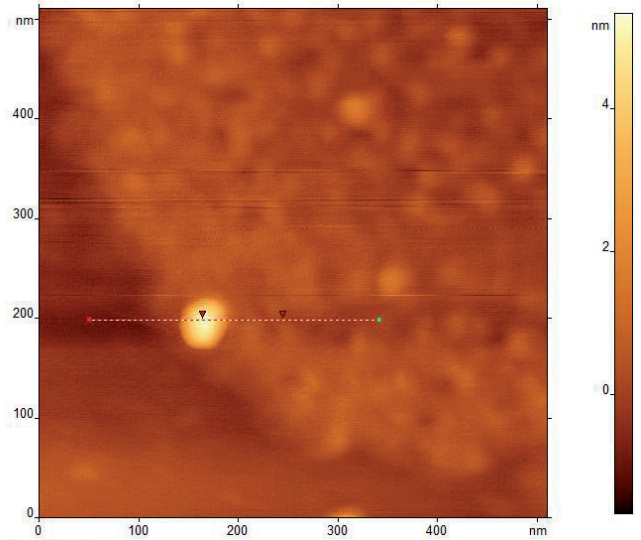
Результаты исследования рентгенограммы рутил/ВОГ (**Рис. 7**) показали наличие двух фаз:  $\text{TiO}_2$  (JCPDS # 86-0147, тетрагональная, пространственная группа  $R4_2/mmm$ ,  $a = 4.594 \text{ \AA}$ ,  $c = 2.958 \text{ \AA}$ ) и графена. Рефлексы оксида титана (рутил) на дифрактограмме сужены, что свидетельствует о значительных размерах исследуемых частиц. По формуле Дебая-Шерера было рассчитано, что средний размер частиц  $\text{TiO}_2$  (рутил) составляет около 170-180 нм.

По изображениям АСМ частиц рутил/ВОГ (**Рис. 8**) можно сказать, частицы рутила находятся только на поверхности чешуек графена, средняя высота их составляет 180 нм. Толщина чешуек графена составляет 5 нм, а латеральный размер чешуек графена 1 мкм.

На микрофотографии исследуемого образца рутил/ВОГ (**Рис. 9**) четко видно, что частицы иммобилизованы на поверхности графена.



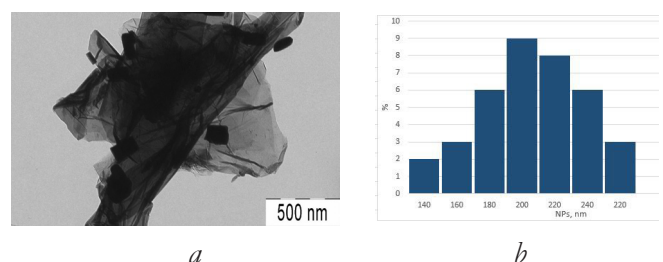
**Рис. 7.** Рентгенограмма рутил/ВОГ.



**Рис. 8.** а) изображение АСМ/ВОГ), б) продольное сечение вдоль линии среза.

Также по гистограмме распределения по размерам средний размер НЧ  $\text{TiO}_2$  составил 200 нм.

Анализ РФА представлен на **Рис 10**. На изображении можно увидеть наличие двух фаз:  $\text{TiO}_2$  (# 78-1510, тетрагональная, пространственная группа  $R4_2/mmm$ ) и графен. Рефлексы исследуемого образца оксида титана на рентгенограмме расширены, что говорит о больших размерах наночастиц. Пик при  $26^\circ$  соответствует пику графена. Был рассчитан средний размер по формуле Дебая-Шерера,



**Рис. 9.** а) микрофотография рутил/ВОГ), б) гистограмма распределения по размерам.

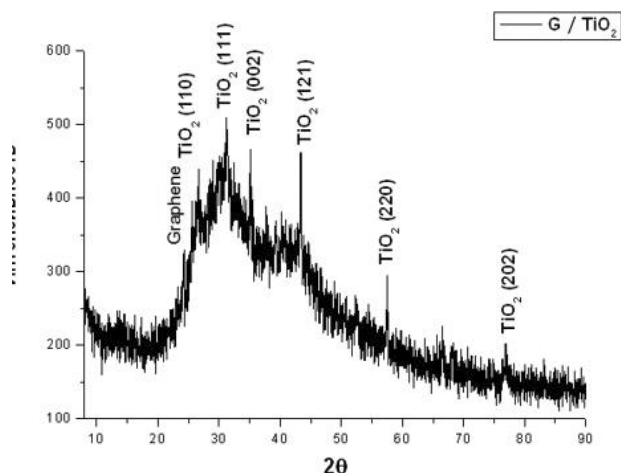


Рис. 10. Рентгенограмма композит рутил/ВОГ.

который составил 180 нм. По полученным данным видно, что после восстановления в сверхкритическом изопропанолe, наночастицы оксида титана не восстановились до Ti, что характерно для порошков анатаза, как было показано ранее [13].

По микрофотографии АСМ (Рис. 11) видно, что частицы рутила находятся на поверхности чешуек графена. Размер частиц рутила составляет 180 нм, что соответствует данным РФА. Также по продольному сечению вдоль линии среза можно сказать, что толщина чешуек графена равна 3 нм, а латеральный размер чешуек графена – 1.5 мкм.

По результатам просвечивающей электронной микроскопии на Рис. 12, видно, что полученные частицы рутила имеют форму, близкую к сферической, также они иммобилизованы на поверхности чешуек графена. Была построена гистограмма распределения по размерам, и показано, что средний размер частиц рутила составляет 180 нм.

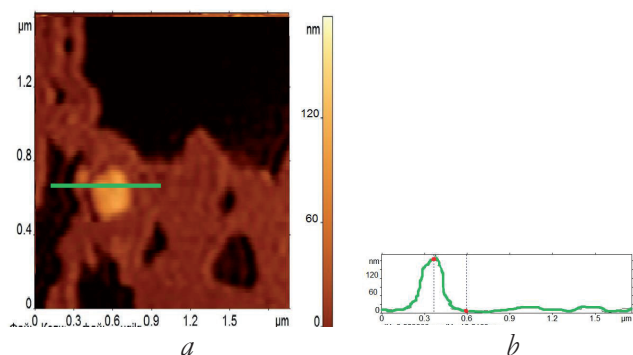


Рис 11. а) изображение АСМ частиц рутил ВОГ, б) продольное сечение вдоль линии среза.

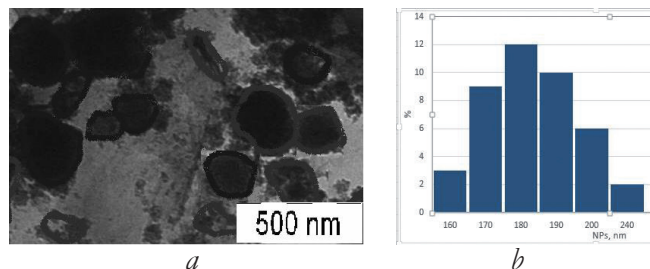


Рис. 12. а) микрофотография рутил/ВОГ, б) гистограмма распределения по размерам.

Полученные частицы рутила на ВГО были охарактеризованы физико-химическими методами и был определен их размер, который составил 180 нм. При фиксации частиц на поверхности чешуек графена размер частиц укрупнился до 200 нм. Также были получены частицы рутила на поверхности ВОГ методом one-pot, размер которых составил также 180 нм. Если сравнивать толщину чешуек графена в обоих случаях, то в одностадийном методе она составила 3 нм (до 8 слоев). Это меньше, чем в двухстадийном методе.

Сравнивая двухстадийный метод и метод one-pot можно сказать, что в случае одностадийного метода размер частиц оказался несколько меньше, и толщина чешуек графена меньше, она составила 5 слоев. Кроме того, одностадийный метод синтеза занимает в 2 раза меньше времени в сравнении с двухстадийным. Однако получение наночастиц рутила (с размером частиц рутила менее 100 нм) на ВОГ требует дальнейших экспериментов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проделанной работы двумя методами были получены и исследованы композиты ВОГ–TiO<sub>2</sub> (рутил). В основе использованных методов лежит восстановление оксида графена в сверхкритическом изопропанолe.
2. Показано, что при использовании дисперсии заранее приготовленных наночастиц оксидов металла и оксида графена образуются композиты, содержащие микрочастицы рутила на поверхности чешуек графена. Размеры микрочастиц рутила составляют 180 нм, чешуйки графена толщиной 3-5 слоев с латеральным размером до 500 нм.

3. Показано, что можно получить те же композиты в одну стадию (метод one-pot) при введении в реакционную смесь соли металла и оксида графена с последующим восстановлением сверхкритическим изопропанолом.
4. Сверхкритический изопропанол во всех процессах используется как среда проведения реакций и как восстановитель оксида графена.
5. Полученные композиты исследованы методами рентгенофазового анализа, атомно-силовой микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грошкова ЮА, Буслаева ЕЮ, Губин СП. Превращение оксида графена в сверхкритических средах. *Известия Академии наук. Сер. хим.*, 2019, 11:2028-2032.
2. Иони ЮВ, Грошкова ЮА, Губин СП, Буслаева ЕЮ. Оксид графена как полимер. *Российский нанотехнологии*, 2020, 15(2):181-187. DOI: 10.1134/S1992722320020119.
3. Грошкова ЮА, Корнилов ДЮ, Ткачев СВ, Губин СП. Влияние ультразвуковой обработки на функциональные группы и латеральный размер чешуек оксида графена. *Российские нанотехнологии*, 2022, 17(3):405-414. DOI: 10.56304/S1992722322030050.
4. Ioni YV, Kraevskii SV, Groshkova YA, Buslaeva EYu. Immobilization of  $\text{In}_2\text{O}_3$  nanoparticles on the surface of reduced graphene oxide. *Mendeleev Commun.*, 2021, 31(5):718-720. DOI: 10.1016/j.mencom.2021.09.042.
5. Буслаева ЕЮ, Краевский СВ, Грошкова ЮА, Ткачев СВ, Губин СП. Синтез и исследование наночастиц висмута на графене. *Журнал неорганической химии*, 2020, 65(1):8-15.
6. Ruidiàz-Martínez M, Álvarez MA, López-Ramón MV, Cruz-Quesada G, José Rivera-Utrilla J, Sánchez-Polo M. Hydrothermal Synthesis of rGO-TiO<sub>2</sub> Composites as High-Performance UV Photocatalysts for Ethylparaben Degradation. *Catalysts*, 2020, 10(5):520-575; doi: 10.3390/catal10050520.
7. Shoyiga HO, Martincigh BS, Nyamori VO. Hydrothermal synthesis of reduced graphene oxide-anatase titania nanocomposites for dual application in organic solar cells. *Int. J. Energy Res.*, 2021, 45:7293-7314; doi: 10.1002/er.6313.
8. Rommozzi E, Zannotti M, Giovannetti R, D'Amato CA, Ferraro S, Minicucci M, Di Cicco RGA. Reduced Graphene Oxide/TiO<sub>2</sub> Nanocomposite: From Synthesis to Characterization for Efficient Visible Light Photocatalytic Applications. *Catalysts*, 2018, 8(12):598; doi: 10.3390/catal8120598.
9. Lambert TN, Chavez CA, Hernandez-Sanchez B, Lu P, Bell NS, Ambrosini A, Friedman T, Boyle TJ, Wheeler DR, Huber DL: Synthesis and characterization of titania-graphene nanocomposites. *J Phys Chem C*, 2009, 113(46):19812-19823.
10. Mahshid S, Askari M, Ghamsari MS. Synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by hydrolysis and peptization of titanium isopropoxide solution. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 189(1-3):296-300. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.01.040.
11. Hummers WS, Offeman RE. Preparation of graphitic oxide. *J. Am. Chem. Soc.*, 1958, 80(6):1339-1339; doi: 10.1021/ja01539a017.
12. Ткачев СВ, Буслаева ЕЮ, Наумкин АВ, Котова СА, Лауре ИВ, Губин СП. Графен полученный восстановлением оксида графена. *Неорганические материалы*, 2012, 48(8):909-915.
13. Губин СП, Буслаева ЕЮ. Сверхкритический изопропанол как восстановитель неорганических оксидов. *Сверхкритические флюиды: Теория и практика*, 2009, 4(4):73-96.

**Грошкова Юлия Александровна**

*с.н.с.*

НПО "Графеника"

1/7-8, ул. Пермская, Москва 107143, Россия

E-mail: juliagroshkova@yandex.ru

**Краевский Сергей Владимирович**

*к.х.н.*

Фед. науч.-клинич. центр физ.-хим. медицины им. акад. Ю.М. Лопухина

1а, ул. М.Пироговская, Москва 119435, Россия

E-mail: kraevskii@mail.ru

**Буслаева Елена Юрьевна**

*д.х.н.*

ИОНХ им Н.С Курнакова РАН

31, Ленинский просп., Москва 119090, Россия

E-mail: buslaeva@igic.ras.ru.



DOI: 10.17725/rensit.2023.15.161

## Получение полимерных композиционных материалов на основе наночастиц оксида цинка, синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука

<sup>1</sup>Булычев Н.А., <sup>2</sup>Михайлов Ю.Г.

<sup>1</sup>Московский авиационный институт, <http://www.mai.ru/>

Москва 125993, Российская Федерация

<sup>2</sup>Московский институт электронной техники, <http://www.miet.ru/>

Зеленоград 124498, Москва, Российская Федерация

E-mail: [nbulychev@mail.ru](mailto:nbulychev@mail.ru), [icc.miet@mail.ru](mailto:icc.miet@mail.ru)

Поступила 24.05.2023, рецензирована 31.05.2023, принята 07.06.2023

Представлена действительным членом РАЕН С.П. Губиньм

**Аннотация:** Синтезированы наночастицы оксида цинка и на их основе получены и исследованы образцы плёнок полимерных композиционных материалов. Наночастицы оксида цинка синтезированы в плазменном разряде под действием ультразвуковой кавитации. Для создания композитов с гомогенным распределением наночастиц использовали растворную технологию, а затем технологию компаундирования в расплаве. Получены композиционные материалы на основе сополимера полиэтилена и винилацетата и наночастиц оксида цинка, причем использовались наночастицы не обработанные ультразвуком и обработанные ультразвуком. Полученные образцы композиционных материалов исследованы методами рентгенофазового анализа, рентгенофлуоресцентного анализа и сканирующей электронной микроскопии. Показано, что наблюдаются различия между образцами: в случае наночастиц без ультразвукового воздействия частицы сильнее агрегированы внутри композиционного материала и средний размер их визуально больше, чем в случае образца с наночастицами, подвергнутыми ультразвуковому воздействию.

**Ключевые слова:** наночастицы, полимеры, композиционные материалы, оксид цинка

**PACS:** 61.46.+w

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-19-00540.

**Для цитирования:** Булычев Н.А., Михайлов Ю.Г. Получение полимерных композиционных материалов на основе наночастиц оксида цинка, синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):161-168. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.161.

## Synthesis of polymer composite materials based on zinc oxide nanoparticles synthesized in a plasma discharge under the ultrasonic action

**Nikolay A. Bulychev**

Moscow Aviation Institute, <http://www.mai.ru/>

Moscow 125993, Russian Federation

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

**Yuri G. Mikhaylov**

National Research University of Electronic Technology, <http://www.miet.ru/>

Zelenograd 124498, Moscow, Russian Federation

E-mail: [icc.miet@mail.ru](mailto:icc.miet@mail.ru)

Received May 24, 2023, peer-reviewed May 31, 2023, accepted June 07, 2023

*Abstract:* Zinc oxide nanoparticles were synthesized and samples of films of polymer composite materials on their basis were obtained and studied. Zinc oxide nanoparticles were synthesized in a plasma discharge under the action of ultrasonic cavitation. To create composites with a homogeneous distribution of nanoparticles, solution technology was used, and then melt compounding technology. Composite materials based on a copolymer of polyethylene and vinyl acetate and zinc oxide nanoparticles were obtained, and not sonicated and sonicated nanoparticles were used. The obtained samples of composite materials were studied by X-ray phase analysis, X-ray fluorescence analysis and scanning electron microscopy. It was shown that there are differences between the samples: in the case of nanoparticles without ultrasonic treatment, the particles are more strongly aggregated inside the composite material and their average size is visually larger than in the case of a sample with nanoparticles subjected to ultrasonic treatment.

*Keywords:* nanoparticles, polymers, composite materials, zinc oxide

**PACS:** 61.46.+w

*Acknowledgments:* This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-19-00540.

*For citation:* Nikolay A. Bulychev, Yuri G. Mikhaylov. Obtaining polymer composite materials based on zinc oxide nanoparticles synthesized in a plasma discharge under the action of ultrasound. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):161-168e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.161

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (162)
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (163)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (164)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (167)

## ЛИТЕРАТУРА (167)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время композиционные материалы на основе различных классов полимеров, армированные наноразмерными наполнителями различного состава и различной геометрии (в виде сфер, волокон, планарных двумерных структур и т.д.) активно применяются в различных областях науки и техники, представляя собой весьма конкурентоспособную альтернативу материалам из металлов и сплавов. Высокие удельные механические характеристики делают этот класс материалов крайне ценным при применении в качестве конструкционных материалов в промышленности (аэрокосмической, автомобильной), а также в ряде других областей [1-6].

При использовании в качестве наполнителей наночастиц на основе металлов и керамики и органических полимеров в качестве матрицы необходимо учитывать весьма слабую адгезию наночастиц

к материалу полимерной матрицы, что обусловлено химической инертностью поверхности наночастиц. Очевидно, что при отсутствии химического взаимодействия компонентов композиционного материала будет достигнут весьма низкий уровень прочности межфазного взаимодействия на границе раздела наночастицы-матрица, и это будет отрицательно влиять на физико-механические характеристики всего получаемого материала [3,4]. Особенно четко этот эффект проявляется при исследовании плёнок из такого композиционного материала, где особенно важно упрочнение за счёт импрегнированных включений.

В настоящее время для увеличения прочности межфазного взаимодействия между полимером и наполнителями применяются различные методы, среди которых выделяются химическая или физическая модификация поверхности наполнителей [7], функционализация полимерной матрицы [8], обработка плазмой [9], in-situ полимеризация полимера на поверхности наполнителя [10] и т.д. Общей особенностью всех вышеперечисленных методов является формирование на поверхности армирующих частиц

реакционноспособных функциональных групп, способных образовывать прочные химические связи с матричным полимером. Однако следует учитывать, что данные методы и подходы должны осуществляться с учетом индивидуальных особенностей каждой конкретной пары наполнитель-полимер, и обеспечивать требуемый уровень межфазного взаимодействия в получаемом композите [11-14].

При разработке методов, технологии и оборудования для получения функциональных и конструкционных композиционных материалов, а также функциональных элементов из наполненных полимеров необходимо также обеспечение физико-химических и физико-механических характеристик получаемых материалов, что определяется как свойствами дисперсного наполнителя, так и взаимодействием наполнителя и матрицы.

Поэтому в рамках настоящей работы в плазменном разряде под действием ультразвуковой кавитации были синтезированы наночастицы оксида цинка и на их основе были получены и исследованы образцы пленок полимерных композиционных материалов.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наночастицы оксида цинка были синтезированы в плазменном разряде под действием ультразвуковой кавитации по методике, отработанной ранее [15-17]. Для создания композитов с гомогенным распределением наночастиц использовали растворную технологию, а затем технологию компаундирования в расплаве с помощью лабораторных смесительных валльцев с подогревом. В качестве полимерной матрицы использовали сополимер этилена с винилацетатом. Содержание винилацетата в сополимере 28%, показатель текучести расплава 25 г/10 мин.

Сополимер растворяли в химически чистом бутилацетате при 60°C при перемешивании магнитной мешалкой. В полученный раствор всыпали порошок наночастиц, продолжая перемешивание. Для разбивания агломератов частиц в растворе полимера использовали погружной высокоскоростной диспергатор IKA T18 Digital ULTRA TURRAX в течение 10 мин при скорости 10000 об/мин. Для ультразвуковой обработки наночастиц перед получением образца использовали ультразвуковой излучатель "Техносоник-1000" при частоте 40 кГц и интенсивности 2 Вт/см<sup>2</sup> в течение 2 мин. После диспергирования растворы высушивали под тягой. Высушенные образцы затем подвергали вальцеванию. Смесительные валльцы предназначены для приготовления и переработки резиновых, пластиковых смесей при различных параметрах технологических процессов. Перед вальцеванием измельченные компоненты подвергали кондиционированию при температуре 50±5°C в сушильном шкафу (Loip, Россия) в течение 3 часов.

Для получения композита получившийся высушенный концентрат разбавляли гранулами чистого сополимера до итоговой концентрации наполнителя 1% масс. Смешивание в расплаве осуществляли на лабораторных смесительных валльцах UBL-6175-BL (Dongguan BaoPin International Precision Instruments Co., Ltd., КНР). При компаундировании использовали следующие технологические параметры: 8 об/мин и зазор между валками 1 мм, температурный режим валков 130°C и 150°C. Далее осуществляли прессование плёнок на целлофановой подложке с помощью лабораторного гидравлического пресса РПА-12 (Биолент, Россия) при температуре 150°C и давлении 20 кгс/см<sup>2</sup>.



Идентификация фазового состава полученных образцов была осуществлена на установке Bruker D8 Advance, работающей в режиме отражения на  $\text{Cu-K}\alpha$  – излучении (40 кВ, 40 мА,  $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ). Качественное определение металла в полученных образцах материалов методом рентгенофлюоресцентного анализа проводили на анализаторе Olympus Vanta (Япония) в режиме GeoChem с 3-х лучевым режимом (время сканирования 45 с на каждом луче). Морфологию исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Carl Zeiss Supra 40-30-87.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как было показано в предыдущих исследованиях, комбинированное воздействие на жидкую среду импульсных или стационарных электрических полей и ультразвуковых колебаний высокой интенсивности выше порога кавитации приводит к возникновению в кавитирующей жидкой среде особой формы электрического разряда [15-17]. Такой тип разряда является мало изученным до сих пор физическим явлением, обладающим оригинальными электрофизическими и оптическими характеристиками. При этом, как было доказано ранее, использование ультразвуковой кавитации позволяет решить задачу предотвращения агломерации синтезированных наночастиц после синтеза и активирует их поверхность, создавая на ней дополнительные активные центры адсорбции, что способствует эффективному взаимодействию таких частиц с органическими полимерами и позволяет создавать полимерные композиционные материалы с высокими эксплуатационными свойствами [15-17].

В качестве исходных материалов для синтеза наночастиц использовались металлические электроды из цинка. Синтез проводился в различных жидких средах:

воде, спиртах (этанол, изопропанол). Нанометровый размер и высокая устойчивость наночастиц к агрегации позволили получать относительно устойчивые водные дисперсные системы (суспензии) наночастиц без применения каких-либо соединений-стабилизаторов [15-17].

Это объясняется тем, что, во-первых, ультразвуковое воздействие на жидкофазную среду в режиме развитой кавитации изменяет в процессе синтеза наночастиц условия электрического пробоя между разрядными электродами в реакционной камере за счёт того, что кавитационные пузырьки в жидкости в электрическом поле способны выстраиваться в цепочки, изменяя таким образом среду с жидкофазной на парожидкостную; а сам разряд при этом имеет падающую вольт-амперную характеристику, схожую с вольт-амперной характеристикой аномального тлеющего разряда. Оптически это определяется в виде более интенсивного свечения разряда. Во-вторых, интенсивная ультразвуковая кавитация в процессе синтеза обеспечивает эффективное диспергирование образующихся частиц [15-17]. В случае ассоциации наночастиц производилось их дополнительное ультразвуковое диспергирование в водной среде в течение 1 мин.

Типичными параметрами разряда при синтезе наночастиц являются: напряжение постоянного тока 30-60 В, сила тока 3-5 А [15-17]. Такие параметры выбраны, с одной стороны, исходя из необходимости обеспечить устойчивое горение разряда, а с другой стороны – создать воспроизводимые условия для синтеза наночастиц.

На следующем этапе работы было проведено введение синтезированных в плазменном разряде наночастиц оксида цинка в полимерную матрицу для получения полимерных композиционных материалов и исследованы их физико-механические

свойства. В качестве матрицы на данном этапе использовался сополимер полиэтилена и винилацетата. Были получены композиционные материалы на основе наночастиц оксида цинка, причем использовались наночастицы, не обработанные ультразвуком и обработанные ультразвуком.

На Рис. 1 и Рис. 2 представлены данные исследований образцов полимерных плёнок на основе сополимера полиэтилена и винилацетата в качестве матрицы и наночастиц оксида цинка в качестве наполнителя методом рентгенофазового анализа.

По данным рентгенофазового анализа в образце присутствуют минимум две фазы. Сильно уширенный пик при  $2\theta = 22^\circ$  соответствует фазе сложносоставного полимера. Также на дифрактограмме присутствуют пики при значениях  $2\theta$ :  $31.29^\circ$ ,  $34.68^\circ$  и  $36.50^\circ$ , соответствующие фазе оксида цинка (JCPDS # 36-1451, структура вюрцит).

По данным рентгенофазового анализа в образце с наночастицами после ультразвуковой обработки также присутствуют фаза сложносоставного полимера (сильно уширенный пик при  $2\theta = 21.2^\circ$ ) и пики при  $2\theta$ :  $31.90^\circ$ ,  $34.61^\circ$  и  $36.52^\circ$ ,

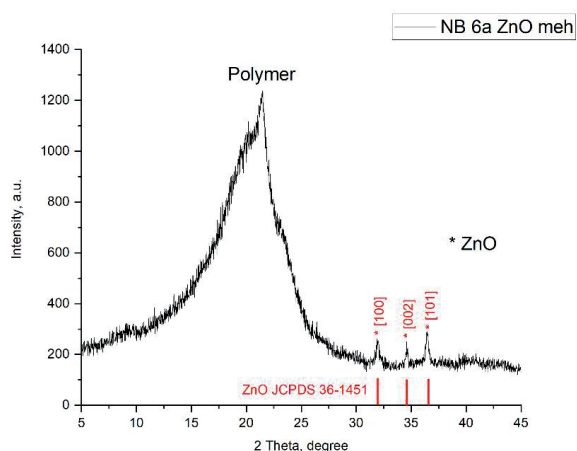


Рис. 1. Результаты исследования методом рентгенофазового анализа образца композиционного материала на основе наночастиц без обработки ультразвуком.

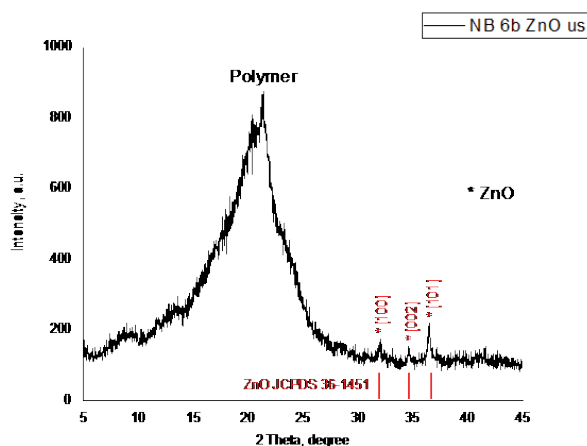


Рис. 2. Результаты исследования методом рентгенофазового анализа образца композиционного материала на основе наночастиц после обработки ультразвуком.

соответствующие фазе оксида цинка (JCPDS # 36-1451, структура вюрцит). Следует отметить некоторое снижение интенсивности пика, соответствующего полимеру по сравнению с данными Рис. 1, а также некоторое снижение интенсивности пиков, соответствующих фазе оксида цинка. Это может указывать на усиление взаимодействия поверхности наночастиц с полимером при использовании ультразвука, а также на снижение размера самих наночастиц наполнителя.

На Рис. 3 и Рис. 4 представлены данные исследований образцов

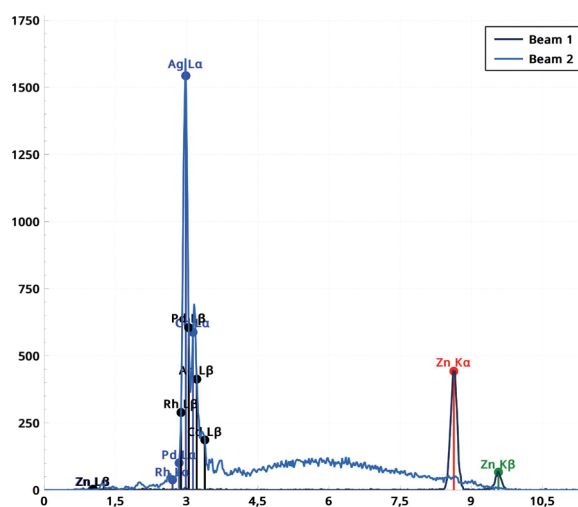
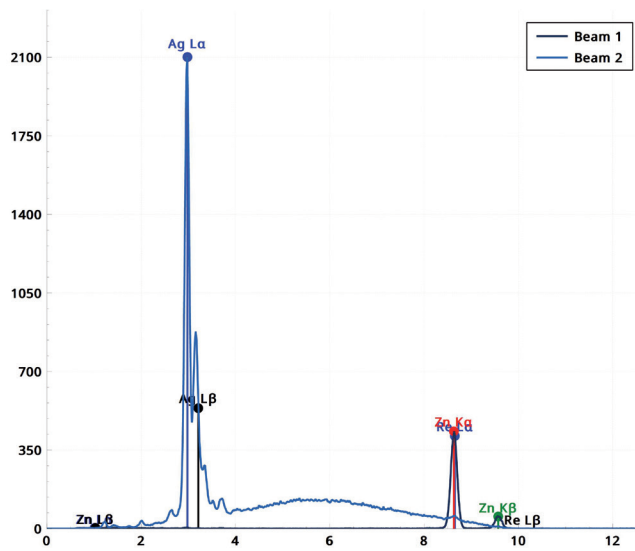


Рис. 3. Результаты исследования методом рентгенофлуоресцентного анализа образца композиционного материала на основе наночастиц без обработки ультразвуком.



**Рис. 4.** Результаты исследования методом рентгенофлуоресцентного анализа образца композиционного материала на основе наночастиц после обработки ультразвуком.

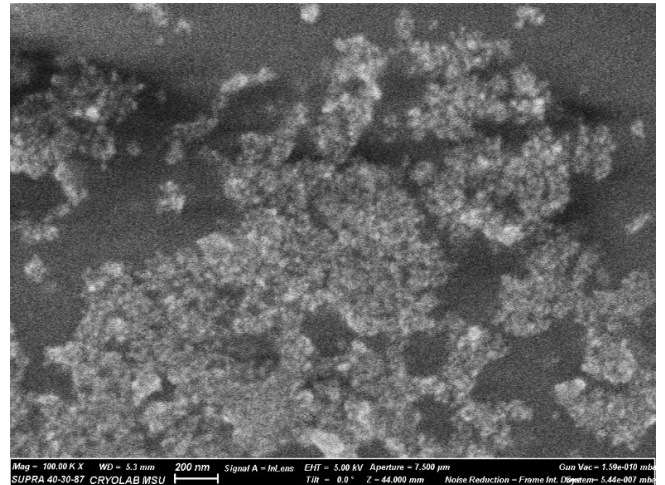
полимерных плёнок на основе сополимера полиэтилена и винилацетата в качестве матрицы и наночастиц оксида цинка в качестве наполнителя методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Согласно данным рентгенофлуоресцентного анализа, в образце качественно подтверждено наличие наночастиц оксида цинка.

Рентгенофлуоресцентный анализ также качественно подтвердил присутствие оксида цинка в образце плёнки. При этом интенсивность пика повышается по сравнению с образцом, полученным на основе наночастиц без ультразвуковой обработки.

На **Рис. 5** и **Рис. 6** представлены данные исследований образцов полимерных плёнок на основе сополимера полиэтилена и винилацетата в качестве матрицы и наночастиц оксида цинка в качестве наполнителя методом сканирующей электронной микроскопии.

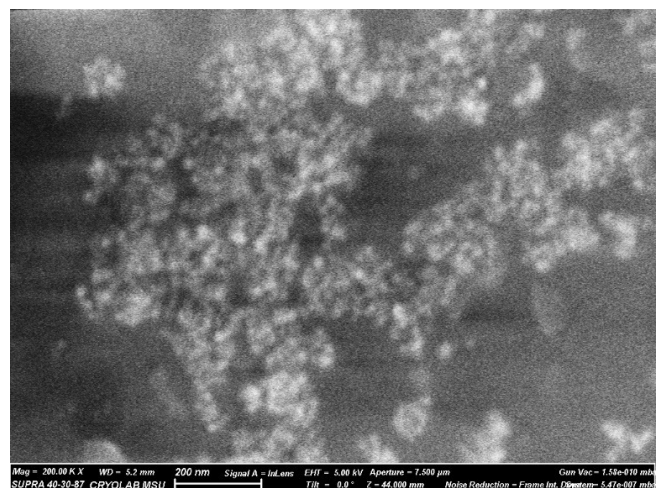
Метод сканирующей электронной микроскопии подтверждает, что наночастицы оксида цинка заключены внутри полимерной плёнки. При этом наблюдаются



**Рис. 5.** Результаты исследования методом сканирующей электронной микроскопии образца композиционного материала на основе наночастиц без обработки ультразвуком.

различия между образцами: в случае наночастиц без ультразвукового воздействия частицы сильнее агрегированы внутри композиционного материала и средний размер их визуально больше, чем в случае образца с наночастицами, подвергнутыми ультразвуковому воздействию.

Таким образом, в результате проведенных исследований методами физико-химического анализа показано, что активация поверхности частиц с помощью методов физического и физико-химического воздействия является важным



**Рис. 6.** Результаты исследования методом сканирующей электронной микроскопии образца композиционного материала на основе наночастиц после обработки ультразвуком.



фактором, способным существенно повысить эффективность взаимодействия частиц наполнителя и полимерной матрицы. Среди физических методов следует отметить прежде всего воздействие интенсивного ультразвука. Применение методов, которые бы позволяли синтезировать частицы наполнителя с активированной поверхностью, способно дать большой импульс к получению композиционных материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками [15-17].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были получены и исследованы композиционные материалы в виде плёнок на основе наночастиц оксида цинка, не обработанных ультразвуком и обработанных ультразвуком. По данным рентгенофазового анализа в образце с наночастицами после ультразвуковой обработки отмечается некоторое снижение интенсивности пика, соответствующего полимеру. Это может указывать на усиление взаимодействия поверхности наночастиц с полимером при использовании ультразвука, а также на снижение размера самих наночастиц наполнителя. Рентгенофлюоресцентный анализ также качественно подтвердил присутствие оксида цинка в образце плёнки. При этом интенсивность пика повышается по сравнению с образцом, полученным на основе наночастиц без ультразвуковой обработки. Метод сканирующей электронной микроскопии подтверждает, что наночастицы оксида цинка заключены внутри полимерной плёнки. При этом наблюдаются различия между образцами: в случае наночастиц без ультразвукового воздействия частицы сильнее агрегированы внутри композиционного материала и средний размер их визуально больше, чем в случае образца с наночастицами, подвергнутыми ультразвуковому воздействию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sai Krishna Samudrala C, Krishna Sai Radhi P, Murthy BS. Metal, ceramics and polymer nano-composites for various applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56(3):1120-1128. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.316.
2. Nanda T, Singh, Shelly D, Mehta R. Advancements in multi-scale filler reinforced epoxy nanocomposites for improved impact strength: A review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2021, 46:281-329.
3. Pavlović VB, Pavlović VP. Polymer-ceramic nanocomposites and converging technologies. *Encyclopedia of Materials: Composites*, 2021, 2:134-144.
4. Khare V, Srivastava S, Kamle S, Kamath GM. Effect of Filler Functionalization on the Thermo-Mechanical behavior of Polypropylene Nanocomposites. *Procedia Structural Integrity*, 2019, 14:215-225.
5. Pukanszky B. Interfaces and interphases in multicomponent materials: past, present, future. *Eur. Polym. J.*, 2005, 41:645-662.
6. Sharma M, Gao S, Mader E, Sharma H, Wei LY, Bijwe J. Carbon surfaces and composite interphases. *Compos. Sci. Technol.*, 2014, 102:35-50. DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.07.005.
7. Wen Z, Xu C, Qian X, Zhang Y, Wang X, Song S, Dai M, Zhang C. A two-step carbon fiber surface treatment and its effect on the interfacial properties of CF/EP composites: The electrochemical oxidation followed by grafting of silane coupling agent. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, 486:546-554.
8. Salavagione HJ, Martinez G. Importance of covalent linkages in the preparation of effective reduced graphene oxide-poly(vinyl chloride) nanocomposites. *Macromolecules*, 2011, 44:2685-2692.
9. Lin J, Sun C, Min J, Wan H, Wang S. Effect of atmospheric pressure plasma treatment on surface physicochemical properties of carbon fiber reinforced polymer and its interfacial

- bonding strength with adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 12:199-205.
10. Rafiee MA, Rafiee J, Srivastava I, Wang Z, Song H, Yu ZZ, Koratkar N. Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *Small*, 2010, 6(2):179-183. DOI: 10.1002/sml.200901480.
  11. Jeziorska R, Zielecka M, Gutarowska B, Zakowska Z. High density polyethylene composites filled with nanosilica containing immobilized nanosilver or nanocopper: thermal, mechanical, and bactericidal properties and morphology and interphase characterization. *Int. J. Polym. Sci.*, 2014, 10:1-13.
  12. Pourbeyram S, Mohammadi S. Synthesis and characterization of highly stable and water dispersible hydrogel-copper nanocomposite. *J. Non-Crystalline Solids*, 2014, 402:58-63.
  13. Xue B, Jiang Y, Li G. Preparation of Cu/Dickite/LLDPE nanocomposites and synergistic effect of exfoliated dickite and nano Cu in LLDPE matrix. *Polymer Composites*, 2013, 34(7):1061-1070.
  14. Cárdenas G, Diaz J, Meléndrez MF, Cruzat C, García A. Colloidal Cu nanoparticles/chitosan composite film obtained by microwave heating for food package applications. *Polym. Bull.*, 2009, 62:511-524.
  15. Bulychev NA. Preparation of Stable Suspensions of ZnO Nanoparticles with Ultrasonically Assisted Low-Temperature Plasma. *Nanosci. Techn.: An International J.*, 2021, 12(3):91-97.
  16. Bulychev NA, Kolesnik SA. Reinforcement of Polymer Composite Materials by Titanium Dioxide Nanoparticles Synthesized in Plasma Discharge under Ultrasonic Cavitation. *IOP Conf. Proc.*, 2022, 2231:012012.
  17. Bulychev NA. Study of Interaction of Surface-Active Polymers with ZnO Nanoparticles Synthesized in Ultrasonically Assisted Plasma Discharge. *Nanosci. Techn.: An International J.*, 2022, 13(1):55-65.
- Булычев Николай Алексеевич**  
доктор химических наук  
Московский авиационный институт  
4, Волоколамское ш., Москва 125993, Россия  
E-mail: nbulychev@mail.ru
- Михайлов Юрий Геннадьевич**  
кандидат технических наук  
Московский институт электронной техники  
1, пл.Шокина, Зеленоград 124498, Москва, Россия  
E-mail: icc.miet@mail.ru.

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.169

## Голографическая обработка гидроакустической информации с применением линейных антенн

<sup>1</sup>Кузькин В.М., <sup>2</sup>Пересёлков С.А., <sup>3</sup>Матвиенко Ю.В., <sup>4</sup>Грачев В.И., <sup>2</sup>Ткаченко С.А., <sup>2</sup>Стадная Н.П.

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/>  
Москва 119991, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, <http://www.vsu.ru/>  
Воронеж 394006, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт проблем морских технологий ДВО РАН, <http://www.febras.ru/>  
Владивосток 690091, Российская Федерация

<sup>4</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>  
Москва 125009, Российская Федерация

*E-mail:* [kumiov@yandex.ru](mailto:kumiov@yandex.ru), [pereselkov@yandex.ru](mailto:pereselkov@yandex.ru); [ymat@marine.febras.ru](mailto:ymat@marine.febras.ru), [grachev@cplire.ru](mailto:grachev@cplire.ru), [sega-th@mail.ru](mailto:sega-th@mail.ru), [stadnaya.edu@yandex.ru](mailto:stadnaya.edu@yandex.ru)

*Поступила 25.05.2023, рецензирована 31.05.2023, принята 07.06.2023*

**Аннотация:** Рассмотрено формирование интерферограммы и голограммы движущегося подводного шумового источника с использованием линейных антенн. Выведена связь спектральной плотности голограммы с апертурой и угловой зависимостью принимаемого поля. Оценен коэффициент усиления антенны. Обсужден вопрос о предельном входном отношении сигнал/помеха, при котором сохраняется работоспособность голографической обработки. Получено аналитическое выражение, устанавливающее связь между отношениями сигнал/помеха на выходе и входе антенны. Сформулированы условия, при которых интерферограмма источника не искажается.

**Ключевые слова:** мелководная акватория, интерферограмма, голограмма, шумовой источник, линейная антенна, отношение сигнал/помеха, параметры антенны

УДК 004.052.34

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>. Численные расчеты параметров антенны С.А. Ткаченко проведены при поддержке гранта Президента РФ МК-4846.2022.4.

**Для цитирования:** Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Матвиенко Ю.В., Грачев В.И., Ткаченко С.А., Стадная Н.П. Голографическая обработка гидроакустической информации с применением линейных антенн. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(2):169-178. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.169.

## Holographic processing of hydroacoustic information using linear antennas

Venedikt M. Kuz'kin

Prokhorov Institute of General Physics of Russian Academy of Sciences, <http://www.gpi.ru/>  
Moscow 119991, Russian Federation

*E-mail:* [kumiov@yandex.ru](mailto:kumiov@yandex.ru)

Sergey A. Pereselkov, Sergey A. Tkachenko, Nadezhda P. Stadnaya

Voronezh State University, <http://www.vsu.ru/>  
Voronezh 394006, Russian Federation

*E-mail:* [pereselkov@yandex.ru](mailto:pereselkov@yandex.ru); [sega-th@mail.ru](mailto:sega-th@mail.ru), [stadnaya.edu@yandex.ru](mailto:stadnaya.edu@yandex.ru)

Yuri V. Matvienko

Institute for Marine Technology Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, <http://www.febras.ru/>



Vladivostok 690091, Russian Federation

E-mail: ymat@marine.febras.ru

### Vladimir I. Grachev

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>

Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: grachev@cplire.ru

Received May 25, 2023, peer-reviewed May 31, 2023, accepted June 07, 2023

**Abstract:** The formation of an interferogram and a hologram of a moving underwater noise source using linear antennas is considered. The relationship between the spectral density of the hologram and the aperture and the angular dependence of the received field is derived. Antenna gain has been estimated. The issue of the limiting signal-to-noise ratio at which the holographic processing remains operational is discussed. An analytical expression is obtained that establishes a relationship between the signal/noise ratios at the output and input of the antenna. Conditions are formulated under which the interferogram of the source is not distorted.

**Keywords:** shallow water area, interferogram, hologram, noise source, linear antenna, signal-to-noise ratio, antenna parameters

UDC 004.052.34

**Acknowledgments:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>. Numerical calculations of antenna parameters S.A. Tkachenko were supported by the grant of the Russian Federation President MK-4846.2022.4.

**For citation:** Venedikt M. Kuz'kin, Sergey A. Pereselkov, Yuri V. Matvienko, Vladimir I. Grachev, Sergey A. Tkachenko, Nadezhda P. Stadnaya. Holographic processing of hydroacoustic information using linear antennas. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):169-178e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.169.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (170)
  2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕНН (171)
    - 2.1. ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА (171)
    - 2.2. ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА (172)
  3. ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН (173)
    - 3.1. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕННОСТИ (173)
    - 3.2. ПРЕДЕЛЬНОЕ ВХОДНОЕ ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ПОМЕХА (173)
    - 3.3. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ (173)
  4. КРИТЕРИИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕИСКАЖЕННОЙ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ (175)
  5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (176)
- ЛИТЕРАТУРА (177)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из актуальных направлений подводных исследований является освещение подводной обстановки, обеспечивающее обнаружение и локализацию (разрешение, определение пеленга, радиальной скорости, удаленности и глубины) движущихся подводных малозумных источников

звука с использованием малогабаритных антенн. Решение этой проблемы на основе голографической обработки, построенной на устойчивых структурных особенностях интерференционной картины (интерферограммы), формируемой шумовым источником, рассмотрено в работах [1–3]. Под интерферограммой понимаются энергетические характеристики принимаемого векторно-скалярного поля в переменных частота-время.

Голографическая обработка реализует квазикогерентное накопление спектральной плотности шумового источника вдоль локализованных полос интерферограммы в переменных частота-время. За время наблюдения  $\Delta t$  в полосе  $\Delta f$  накапливаются  $J$  независимых реализаций длительностью  $t_1$  и с временным интервалом  $t_2$  между ними

$$J = \frac{\Delta t}{t_1 + t_2}. \quad (1)$$

Реализации независимы, если  $t_2 > 1/\Delta f$ . Накопление помехи некогерентно. Формируется интерферограмма в переменных частота-время, к которой применяется

двумерное преобразование Фурье. На выходе интегрального преобразования (голограммы) спектральная плотность концентрируется в узкой полосе в форме фокальных пятен, вызванных интерференцией мод различных номеров. Спектральная плотность помехи распределена по всей области. Такая обработка обладает высокой помехоустойчивостью. По расположению спектральных плотностей голограмм и некоторых априорных данных о канале распространения решаются задачи обнаружения, пеленгования, определения радиальной скорости, удаленности и разрешения источников.

Голографическая обработка сегодня – весьма активная область исследований, в которой получено много интересных результатов, представляющих теоретический и практический интерес. Во-первых, разработан метод восстановления интерферограммы невозмущенного поля на стационарной трассе, когда интенсивные внутренние волны вызывают горизонтальную рефракцию и взаимодействие мод акустического поля [4-7]. Во-вторых, предложен помехоустойчивый метод обнаружения и локализации движущихся малозумных источников, устойчивый по отношению к гидродинамической изменчивости океанической среды [8]. В-третьих, созданы адаптивные алгоритмы определения параметров источника, не требующие знаний о характеристиках среды распространения [9,10]. Далее, в-четвертых, реализован метод разрешения нескольких источников различной интенсивности в условиях, когда их интерферограммы перекрываются по частоте и времени, и маскируются помехой [11]. Наконец, в-пятых, разработан метод выделения мод акустического поля и определения их параметров [12-14]. Немалую роль в прогрессе развития голографической интерферометрии в мелководных акваториях сыграли работы [15-18].

Цель данной статьи, во-первых, описать голографическую обработку с применением линейных антенн и рассмотреть их характеристики, определяющие результативность работы. Во-вторых, выявить условия приема,

при которых не искажается интерферограмма источника в отсутствие помехи.

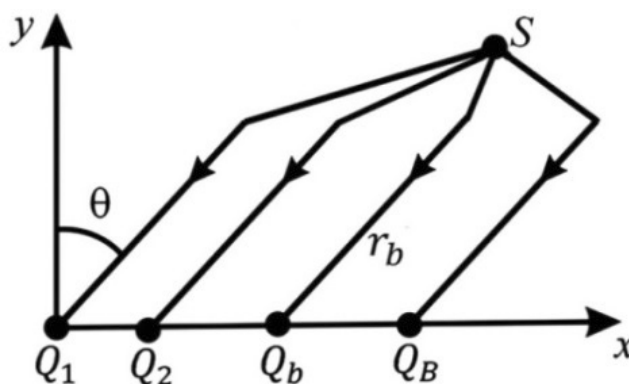
## 2. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕНН

Пусть число элементов  $Q_b$  приемной антенны равно  $B$ ,  $b = \overline{1, B}$ , межэлементное расстояние –  $d$ . Принимаемый спектр шумового источника, движущегося с радиальной скоростью  $w$  на глубине  $z_0$ , сосредоточен в частотном диапазоне  $f_1 \leq f \leq f_2$ , где  $f_{1,2} = f_0 \pm (\Delta f/2)$ ,  $\Delta f$  и  $f_0$  – ширина полосы и средняя частота спектра. Поля с каждого элемента антенны суммируются, и на выходе формируется интерферограмма, к которой применяется двумерное преобразование Фурье. Обработку рассмотрим на примере скалярной компоненты поля, т.е. спектра звукового давления  $p(f, t)$ .

### 2.1. ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА

Схема расположения источника  $S$  и горизонтальной линейной антенны приведена на **Рис. 1**. Элементы антенны находятся на глубине  $z_0$ . Опорным элементом антенны выбран первый элемент  $Q_1$ . Апертура  $L = (B - 1)d$  много меньше расстояния до источника,  $L \ll r_b$ . В этом случае  $r_b = r_1 - (b - 1)d \sin \theta$ , где  $\theta$  – угол, дополнительный к пеленгу.

При суммировании полей с элементов антенны компенсируется разность расстояний от источника до различных ее элементов в направлении угла  $\theta$ . Поэтому поле  $Q_b$  элемента умножается на экспоненциальный множитель  $\exp[ih_*(f_0)(b - 1)d \sin \theta]$ . Здесь  $h_*(f_0)$  – выделенная вещественная часть горизонтального волнового



**Рис. 1.** Геометрия задачи (вид в горизонтальной плоскости):  $r_b$  – горизонтальное расстояние элемента  $Q_b$  до источника  $S$ ,  $\theta$  – угол направления на источник.

числа (постоянная распространения) на средней частоте  $f_0$  спектра источника,  $\theta_*$  – угол компенсации. Поле на выходе  $Q_b$  элемента антенны представим в форме суммы мод [19]

$$p_b(f, r_b) = \sum_m A_m(f, r_b) \exp\left\{i\left[h_m(f)r_1 - 2(b-1)(h_m(f) - h_*(f_0)_*)\right]\right\}, \quad (2)$$

где  $\eta = d\sin\theta/2$ ,  $\eta_* = d\sin\theta_*/2$ .  
Здесь  $A_m$  и  $h_m$  – амплитуда и постоянная распространения  $m$ -моды. Цилиндрическое расхождение поля, модальное затухание, глубины источника  $z_s$  и элементов антенны  $z_b$  учитываются в амплитуде мод. На выходе антенны поле  $p_{an}(f, r_1)$ , пренебрегая зависимостью амплитуды от расстояния,  $A_m(f, r_1) \approx A_m(f, r_b)$ , запишем как

$$p_{an}(f, r_1) = \sum_m A_m(f, r_1) I_m \exp\left\{i\left[h_m(f)r_1 - (B-1)(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)\right]\right\}, \quad (4)$$

где  $I_m(f) = \frac{\sin[B(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)]}{\sin(h_m(f)\eta - h_*(f_0)\eta_*)}$ .  
Интерферограмма антенны  $P_{an}(f, r_1) = |p_{an}(f, r_1)|^2$ , согласно (4), равна

$$P_{an}(f, r_1) = \sum_m \sum_n P_{an}^{(mn)}(f, r_1), \quad (6)$$

$$P_{an}^{(mn)}(f, r_1) = A_m(f, r_1) A_n^*(f, r_1) I_{mn}(f) \times \exp\left[ih_{mn}(f)(r_1 - (B-1)\eta)\right], \quad (7)$$

где  $I_{mn}(f) = I_m(f) I_n(f)$ .  
Здесь  $h_{mn}(f) = h_m(f) - h_n(f)$ . Пусть в начальный момент времени  $t_0 = 0$  расстояние  $r_1 = r_0$ . В интерферограмме (6) от переменной расстояния  $r_1$  перейдем к временной переменной  $t$ ,  $r_1 = r_0 + vt$  и применим к ней двумерное преобразование Фурье.

На выходе интегрального преобразования (голограммы) спектральная плотность выражается через интерферограмму как

$$F_{an}(v, \tau) = 2\pi \int_0^{\Delta t} \int_{f_1}^{\Delta f_2} P_{an}(f, t) \exp[i2\pi(vt - \tau t)] dt df = \sum_m \sum_n F_{an}^{(mn)}(v, \tau), \quad (9)$$

где  $v$  и  $\tau$  – частота и время голограммы;  $\Delta t$  – время наблюдения. Используя подход при вычислении

голограммы одиночного приемника [1], для парциальных голограмм антенны получаем

$$F_{an}^{(mn)}(v, \tau) = 2\pi A_m(f_0, r_0) A_n^*(f_0, r_0) I_{mn}(f_0) \Delta f \Delta t \times \exp\left[i2\pi\left(\frac{v\Delta t}{2} - \tau f_0\right)\right] \times \exp\left\{i\left[h_{mn}(f_0)\left(\frac{w\Delta t}{2} + r - (B-1)\eta\right)\right]\right\} \times \sin\left\{\pi\left[(r_0 - (B-1)\eta + wt_*)\frac{1}{2\pi} \frac{dh_{mn}(f_0)}{df} - \tau\right] \Delta f\right\} \times \frac{\sin\left\{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi v] \frac{\Delta t}{2}\right\}}{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi v] \frac{\Delta t}{2}}. \quad (10)$$

Здесь  $t_*$  – выделенный момент времени на интервале наблюдения  $\Delta t$ ,  $0 < t_* < \Delta t$ . Если положить  $B = 1$ , то  $I_{mn}(f_0) = 1$  и формула (10) переходит в соответствующую формулу для одиночного приемника [1]. Множитель  $I_{mn}(f_0)$  (8) определяет распределение спектральной плотности голограммы антенны по отношению к одиночному приемнику. Зависимости  $I_{mn}(f_0)$  от угла  $\theta$  при угле компенсации  $\theta_* = 0$  рассмотрены в [20].

## 2.2. ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА

Поле на выходе  $b$ -го элемента на горизонтальном удалении  $r$  от источника шума запишем в виде суммы мод как [19]

$$p_b(f, r, z_b) = \sum_m \psi_m(z_b) A_m(f, r) \exp[ih_m(f)r], \quad (11)$$

где  $\psi_m(z)$  – собственная функция  $m$ -й моды. В (11) медленным изменением собственной функции от частоты пренебрегается. На выходе антенны поле источника принимает вид

$$p_{an}(f, r) = \sum_b p_b(f, r) = \sum_m E_m A_m(f, r) \exp[ih_m(f)r], \quad (12)$$

где  $E_m = \sum_b \psi_m(z_b)$ .  
Интерферограмма антенны, согласно (12), равна

$$P_{an}(f, r) = \sum_m \sum_n P_{mn}(f, r), \quad (14)$$

$$P_{mn}(f, r) = E_m E_n^* A_m(f, r) A_n^*(f, r) \exp[ih_{mn}(f)r]. \quad (15)$$

Пусть начальному моменту времени  $t_0 = 0$  соответствует расстояние  $r_0$ . В интерферограмме (14) от переменной расстояния  $r$  перейдем



к временной переменной  $t$  и применим к ней двумерное преобразование Фурье (9). В результате для парциальных голограмм антенны получаем

$$F_{an}^{(mn)}(\nu, \tau) = 2\pi A_m(f_0, r_0) A_n^*(f_0, r_0) E_m E_n^* \Delta f \Delta t \times \exp\left[i2\pi\left(\frac{\nu\Delta t}{2} - \tau f_0\right)\right] \exp\left[ih_{mn}(f_0)\left(\frac{w\Delta t}{2} + r_0\right)\right] \times \frac{\sin\left\{\pi\left[(r_0 + wt_*)\frac{1}{2\pi}\frac{dh_{mn}(f_0)}{df} - \tau\right]\Delta f\right\}}{\pi\left[(r_0 + wt_*)\frac{1}{2\pi}\frac{dh_{mn}(f_0)}{df} - \tau\right]\Delta f} \times \frac{\sin\left\{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi\nu]\frac{\Delta t}{2}\right\}}{[wh_{mn}(f_0) + 2\pi\nu]\frac{\Delta t}{2}}. \quad (16)$$

Если положить  $B = 1$ , то соотношение (16) переходит в выражение для одиночного приемника [1]. Спектральная плотность парциальных голограмм антенны  $F_{an}^{(mn)}$  по отношению к одиночному приемнику отличается весовым множителем  $E_m E_n^*$ . По этой причине области локализации спектральной плотности для антенны и одиночного приемника близки по форме.

### 3. ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН

#### 3.1. Коэффициент усиления и характеристика направленности

Результативность голографической обработки с использованием приемных антенн характеризует коэффициент усиления

$$\chi = G_{an}/G_r \quad (17)$$

и характеристика направленности (горизонтальная антенна)

$$D = G_{an}/\max G_{an}, \quad (18)$$

где

$$G_{an,r} = \iint |F_{an,r}(\tau, \nu)|^2 d\tau d\nu. \quad (19)$$

Индекс "r" относится к одиночному приемнику. В направлении угла компенсации коэффициент усиления горизонтальной антенны достигает максимального значения  $\chi_{\max} \cong B^2$ . Коэффициент усиления  $\chi$  вертикальной антенны  $\chi \approx B^2$ . Таким образом, коэффициенты усиления горизонтальной и вертикальной антенн сопоставимы между собой. Результаты численного моделирования по рассмотрению коэффициента усиления и характеристики

направленности линейных антенн обсуждались в работах [20,21].

#### 3.2. ПРЕДЕЛЬНОЕ ВХОДНОЕ ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ПОМЕХА

Голографическая обработка имеет определенные ограничения, которые кроются в природе интерференционных явлений и наличии помехи. Ограничение, связанное с помехой, удобно характеризовать предельным (минимальным) входным отношением сигнал/помеха (с/п)  $q_{\lim}$ , когда для входных значений с/п  $q_0 > q_{\lim}$  обеспечивается устойчивое обнаружение и оценки пеленга, радиальной скорости, удаления и глубины близки реальным. В случае изотропной помехи и одиночного приемника для скалярной компоненты поля шумового источника  $q_{\lim}^{(r)} \approx 1.5\beta^2$  [2]. Оценка установлена на основании ряда физических соображений и проверена на результатах численных и натурных экспериментов. При использовании комбинационных составляющих векторно-скалярного поля значение  $q_{\lim}^{(r)}$  уменьшается в 2-5 раз [2,3]. Обобщим оценку предельного входного отношения с/п одиночного приемника на линейные антенны.

Положим, что шумовой сигнал и помеха статистически не связанные случайные процессы и на входе элементов антенны помеха не коррелирована. Второе условие выполняется, если  $d \geq \lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны. Тогда предельное входное отношение с/п на элементе антенны оценивается как

$$q_{\lim}^{(an)} = \alpha q_{\lim}^{(r)}, \quad (20)$$

где  $\alpha = B/\chi$ . Значение  $\chi \approx B^2$ , так что  $\alpha \approx 1/B$ . Входные отношения с/п на единичном элементе антенны, когда оценки параметров источника близки реальным значениям, ограничены неравенством  $q_0 > q_{\lim}^{(an)}$ . Если вначале на каждом  $b$ -м приемнике выполнить голографическую обработку и затем на выходе антенны просуммировать спектральные плотности голограмм, то выигрыша в предельном отношении с/п по отношению к одиночному приемнику не получится.

#### 3.3. Помехоустойчивость

Рассмотрим, как связано отношение с/п на выходе антенны  $q_{an}^{(out)}$  с отношением с/п на входе элемента антенны  $q_0$ . Их отношение,

как известно, определяет помехоустойчивость обработки

$$\rho_{an} = \frac{q_{an}^{(out)}}{q_0}. \quad (21)$$

При решении данной задачи проанализируем вначале вопрос о связи отношений с/п на выходе  $q_r^{(out)}$  и входе  $q_0$  одиночного приемника.

Пусть спектры давления шумового сигнала и помехи, которые обозначим  $s(t, f)$  и  $n(t, f)$ , сосредоточены в полосе  $\Delta f$ . Сигнал и помеха являются взаимонезависимыми гауссовскими случайными стационарными процессами с нулевыми математическими ожиданиями. Ограничимся значениями  $q_0$ , удовлетворяющими условию  $q_0 > q_{lim}^{(r)}$ . Примем, что в полосе  $\Delta f$  содержится  $W$  локализованных полос шириной  $\delta f$  и контрастность интерферограммы, т.е. видность полос, равна единице. Положим, что вдоль интерференционных полос поле шумового сигнала накапливается когерентно, а помехи – некогерентно. Строго говоря, это положение не выполняется, однако с качественной и количественной стороны, как показывают данные компьютерного моделирования и натуральных экспериментов [1–3,11], результаты остаются вполне осмысленными.

Под отношением с/п  $q_0$  на входе одиночного приемника в начальный момент времени  $t = 0$  понимается величина

$$q_0 = q(0) = \frac{\bar{E}_s(0)}{\bar{E}_n(0)}, \quad (22)$$

где

$$\bar{E}_s(0) = 2 \int_0^{\infty} \overline{|s(0, f)|^2} df = 2 \Delta f \overline{|s(0, f_s')|^2}, \quad (23)$$

$$\bar{E}_n(0) = 2 \int_0^{\infty} \overline{|n(0, f)|^2} df = 2 \Delta f \overline{|n(0, f_n')|^2}, \quad (24)$$

– средние энергии сигнала и помехи. Здесь  $f_s'$  и  $f_n'$  – выделенные частоты сигнала и помехи в полосе  $\Delta f$ . Черта сверху означает усреднение по ансамблю реализаций. В соответствии с (23), (24) входное отношение с/п (22) равно

$$q_0 = \frac{\overline{|s(0, f_s')|^2}}{\overline{|n(0, f_n')|^2}}. \quad (25)$$

Средние энергии сигнала и помехи на выходе траекторного накопления за время  $\Delta t$  можно записать в форме сложения энергий на временных интервалах длительностью  $t_1$  вдоль интерференционных полос

$$\bar{E}_s(\Delta t) = 2 \int_0^{\infty} \overline{\left| \sum_{j=1}^J W s(t_j, f) \right|^2} df, \quad (26)$$

$$\bar{E}_n(\Delta t) = 2 W J \sum_{j=1}^J \int_0^{\infty} \overline{|n(t_j, f)|^2} df. \quad (27)$$

Пользуясь предположением стационарности процессов, выражения (26), (27) можно привести к виду

$$\bar{E}_s(\Delta t) = 2 W^2 J^2 \overline{|s(f_s'')|^2} \delta f, \quad (28)$$

$$\bar{E}_n(\Delta t) = 2 W J \overline{|n(f_n'')|^2} \delta f, \quad (29)$$

так что на выходе траекторного накопления отношение с/п равно

$$q_r(\Delta t) = \frac{\bar{E}_s(\Delta t)}{\bar{E}_n(\Delta t)} = W J \frac{\overline{|s(f_s'')|^2}}{\overline{|n(f_n'')|^2}}. \quad (30)$$

Здесь  $f_s''$  и  $f_n''$  – выделенные частоты сигнала и помехи в полосе  $\delta f$ .

Используя входное отношение с/п (25), выражение (30) представим в форме

$$q_r(\Delta t) = J W \frac{\overline{|s(f_s'')|^2} \overline{|n(f_n')|^2}}{\overline{|n(f_n'')|^2} \overline{|s(f_s')|^2}} q_0. \quad (31)$$

В начальный момент времени средние энергии сигнала (23) и помехи (24) можно также выразить как

$$\bar{E}_s(0) = 2 W^2 \overline{|s(f_s'')|^2} \delta f, \quad (32)$$

$$\bar{E}_n(0) = 2 W \overline{|n(f_n'')|^2} \delta f. \quad (33)$$

Из сравнения выражений (23), (24) и (32), (33) находим

$$\overline{|s(f_s')|^2} \Delta f_1 = W \overline{|s(f_s'')|^2} \Delta f_2, \quad (34)$$

$$\overline{|n(f_n')|^2} \Delta f_1 = W \overline{|n(f_n'')|^2} \Delta f_2. \quad (35)$$

и тогда выражение (32) принимает вид

$$q_r(\Delta t) = J q_0, \quad (36)$$

так что на выходе траекторного накопления отношение с/п не зависит от числа интерференционных полос  $W$  и их ширины  $\delta f$  и с точностью до множителя  $J$  пропорционально входному отношению с/п  $q_0$ .

Таким образом, многократное когерентное сложение интерференционных максимумов волнового поля шумового источника вдоль локализованных полос увеличивает выходное отношение с/п  $q_r(\Delta t)$  в  $J$  раз по отношению к входному значению  $q_0$ . Такое увеличение становится понятным, если провести аналогию с когерентной пространственной обработкой многоэлементной антенны, содержащей  $J$  приемников: по отношению к одиночному приемнику отношение с/п возрастает в  $J$  раз.

Запись интерферограммы на голограмму и очищение области локализации спектральной плотности от помехи приводит к дополнительному увеличению выходного отношения с/п по сравнению с  $q_r(\Delta t)$ . Двумерное преобразование Фурье интерферограммы локализует двумерную спектральную плотность шумового сигнала в пределах узкой полосы голограммы, площадь которой можно оценить как

$$S_s = \frac{\tau_*}{\Delta t}. \quad (37)$$

Здесь  $\tau_*$  – положение главного максимума фокального пятна на оси времени, обусловленного интерференцией между крайними модами. Спектральная плотность помехи распределена во всей области голограммы, площадь которой равна

$$S_n = |\nu_*| \tau_*, \quad (38)$$

где  $\nu_*$  – положение главного максимума фокального пятна на оси частоты, обусловленного интерференцией между крайними модами. При интегральном преобразовании энергия не изменяется.

Полагая мощность помехи равномерно распределенной в области голограммы, отношение с/п на выходе голографической обработки можно представить как

$$q_r^{(out)} = \gamma q_r(\Delta t), \quad \gamma = S_n / S_s, \quad (39)$$

где коэффициент концентрации, согласно (37), (38),  $\gamma = |\nu_*| \Delta t$ . В случае неподвижного источника величина  $\nu_*$  заменяется шириной спектра  $\Delta \nu$  в области голограммы. В соответствии с (36) выражение (39) принимает вид

$$q_r^{(out)} = J \gamma q_0. \quad (40)$$

Таким образом, помехоустойчивость голографической обработки с применением одиночного приемника оценивается как

$$\rho_r = J \gamma. \quad (41)$$

Нетрудно сообразить, как можно оценить выходное отношение с/п на выходе антенны. Согласно (10), (16) значение коэффициента концентрации  $\gamma$  не изменяется. Принимая во внимание, что шумовой сигнал и помеха накапливаются когерентно и не когерентно, отношение с/п на выходе антенны, по отношению к одиночному приемнику, возрастает в  $1/\alpha = \chi B \approx B$  раз. Следовательно, отношение с/п на выходе антенны составит

$$q_{an}^{(out)} = (J \gamma / \alpha) q_0. \quad (42)$$

#### 4. КРИТЕРИИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕИСКАЖЕННОЙ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ

На формирование интерферограммы, соответственно и голограммы, влияют фоновая помеха, пространственно-временные неоднородности среды распространения и условия приема. В настоящее время состояние вопроса по влиянию искажающих факторов на формирование интерферограммы в основном сконцентрировано на таких аспектах, как помеха [1-3] и интенсивные внутренние волны [4-8].

В данном разделе рассмотрено влияние условий приема – ширины полосы и времени накопления – на формирование неискаженной интерферограммы в регулярном волноводе в отсутствие помехи. Исходя из того, что интерференционная картина источника звука характеризуется частотными  $\Lambda_f^{(mn)}$  и временными  $\Lambda_t^{(mn)}$  масштабами изменчивости, обусловленными интерференцией  $m$ -й и  $n$ -й модами [19]

$$\Lambda_f^{(mn)} = \frac{2\pi}{r |dh_{mn}(f_0)/df|}, \quad \Lambda_t^{(mn)} = \frac{1}{|wh_{mn}(f_0)|}, \quad (43)$$

установим следующие два критерия формирования неискаженной интерферограммы. Для любой пары  $(m, n)$  мод:

I. Частотный диапазон  $f_1 \leq f \leq f_2$  не должен быть меньше частотного периода изменчивости интерферограммы

$$\Delta f \geq \Lambda_f^{(mn)}. \quad (44)$$



П. Время наблюдения  $\Delta t$  не должно быть меньше временного периода изменчивости интерферограммы

$$\Delta t \geq \Lambda_i^{(mn)}. \quad (45)$$

Из условий (44), (45) следуют определенные ограничения на ширину полосы и время наблюдения в зависимости от расстояния, радиальной скорости и частотно-временных масштабов изменчивости передаточной функции среды при формировании неискаженной интерферограммы. Уменьшение расстояния и увеличение средней частоты спектра приводят к требованию повышения ширины полосы. Последнее связано с тем, что при возрастании частоты групповые скорости мод  $u_m(\omega_0) = d\omega/dh_m(\omega_0)$  асимптотически стремятся к значению, не зависящему от номера моды [19]. Уменьшение радиальной скорости и средней частоты спектра вызывают возрастание времени наблюдения. Критерии наиболее критичны по отношению к номерам соседних мод.

Критерий I исключает возможность образования интерферограммы, обусловленной интерференцией  $(m, n)$  мод, с равномерной спектральной плотностью, т.е. в полосе бесконечной ширины, когда локализованные полосы не наблюдаемы. Полезно отметить, что нарушение условия (44) по отношению ко всем парам интерферирующих мод, приводит на голограмме к спектральной плотности в форме единичного фокального пятна в начале координат. Иная ситуация наблюдается при несоблюдении условия (45), когда времени наблюдения недостаточно для пересечения источником пространственных масштабов изменчивости интерференционной картины. В этом случае положение пика фокального пятна, образованного такими интерферирующими модами, смещается на ось времени голограммы, так как по отношению к ним интерферограмма формируется неподвижным источником. Сформулированные условия (44) и (45) позволяют оценить ширину полосы и время наблюдения для уменьшения погрешности восстановления параметров движущегося шумового источника.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Голографическая обработка гидроакустической информации позволила самым существенным образом видоизменить решение проблемы обнаружения и локализации движущихся малошумных подводных источников шума. Оказалось возможным установить в самом общем случае простые и прозрачные связи между измеряемыми характеристиками спектральной плотности голограммы и параметрами малошумного подводного источника. Это придало голографической обработке известную завершенность и весьма ощутимые преимущества, по сравнению с другими видами обработки при решении конкретных задач контроля подводной обстановки при малом входном шумовом сигнале на фоне помехи. В результате достигнуто радикальное упрощение решения задачи обнаружения и локализации источника подводного шума и, вместе с тем, значительное расширение круга задач, вообще поддающихся решению. Например, при малом входном отношении с/п на фоне пространственно-временных неоднородностей и в отсутствие информации о гидроакустических характеристиках среды распространения.

В работе изложена теория голографической обработки гидроакустической информации с применением линейных горизонтальных и вертикальных антенн. Рассмотрена структура интерферограмм и голограмм. Приведены выражения для коэффициента усиления и характеристики направленности. Оценено предельное входное отношение с/п, при превышении которого адекватно восстанавливаются параметры шумового источника звука. Установлена связь между выходным и входным отношениями с/п. Полученные соотношения позволяют рассмотреть большой круг задач контроля подводной обстановки с использованием линейных антенн. Сформулированы ограничения на ширину полосы и времени наблюдения, которые обеспечивают минимальную погрешность восстанавливаемых параметров шумового источника.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море. *Акуст. журн.*, 2017, 63(4):406-418.
2. Kuznetsov GN, Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Kaznacheev IV, Grigor'ev VA. Interferometric method for estimating the velocity of a noise sound source and the distance to it in shallow water using a vector-scalar receiver. *Phys. Wave Phenom.*, 2017, 25(4):299-306.
3. Казначеев ИВ, Кузнецов ГН, Кузькин ВМ, Пересёлков СА. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником. *Акуст. журн.*, 2018, 64(1):33-45.
4. Kuz'kin VM, Pereselkov SA, Zvyagin VG, Malykhin AYu, Prosovetskiy DYU. Intense internal waves and their manifestation in interference patterns of received signals on oceanic shelf. *Phys. Wave Phenom.*, 2018, 26(2):160-167.
5. Badiy M, Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA, Prosovetskiy DYU, Tkachenko SA. Intense internal waves and their manifestation in the interference patterns of received signals on oceanic shelf. Part II. *Phys. Wave Phenom.*, 2019, 27(4):313-319.
6. Кузькин ВМ, Ляхов ГА, Пересёлков СА, Казначеева ЕС. Передача информации через случайно-неоднородную океаническую среду. *Фундам. прикл. гидроф.*, 2021, 14(2):54-64.
7. Kaznacheeva ES, Kuz'kin VM, Pereselkov SA. Interferometric processing of hydroacoustic information in the presence of intense internal waves. *Phys. Wave Phenom.*, 2021, 29(3):278-284.
8. Кузькин ВМ, Пересёлков СА, Казначеева ЕС, Грачев ВИ, Ткаченко СА, Рыбьянец ПВ. Голографическая обработка движущихся источников в мелком море при наличии интенсивных внутренних волн. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(2):197-204. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.197.
9. Kaznacheeva ES, Kuznetsov GN, Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA. Measurement capability of the interferometric method of sound source localization in the absence of data on the waveguide transfer function. *Phys. Wave Phenom.*, 2019, 27(1):73-78.
10. Kaznacheeva ES, Kuz'kin VM, Lyakhov GA, Pereselkov SA, Tkachenko SA. Adaptive algorithms for interferometric processing. *Phys. Wave Phenom.*, 2020, 28(3):267-273.
11. Kuz'kin VM, Kuznetsov GN, Pereselkov SA, Grigor'ev VA. Resolving power of the interferometric method of source localization. *Phys. Wave Phenom.*, 2018, 26(2):150-159.
12. Kuz'kin VM, Matvienko YuV, Pereselkov SA, Prosovetskiy DYU, Kaznacheeva ES. Mode selection in oceanic waveguides. *Phys. Wave Phenom.*, 2022, 30(2):111-118.
13. Кузькин ВМ, Пересёлков СА, Казначеева ЕС, Грачев ВИ, Ткаченко СА, Рыбьянец ПВ. Выделение мод шумового источника в мелком море методом голографической интерферометрии в присутствии интенсивных внутренних волн. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(3):279-286. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.279.
14. Kuz'kin VM, Matvienko YuV, Pereselkov SA, Kaznacheeva ES, Tkachenko SA. Holographic method for mode selection in a shallow sea in the presence of intense internal waves. *Phys. Wave Phenom.*, 2022, 30(5):314-320.
15. Zurk LM, Rouseff D. Striation-based beamforming for active sonar with a horizontal line array. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2012, 132(4):EL264-EL270.
16. Cockrell KL, Schmidt H. Robust passive range estimation using the waveguide invariant. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 127(5):2780-2789.
17. Bonnel J, Touze GLe, Mars JI. Physics-based time-frequency representations for underwater acoustics: Power class utilization with waveguide invariant approximation. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2013, 30(6):120-129.
18. Emmetiere R, Bonnel J, Cristol X, Gehant M, Chonavel T. Passive source depth discrimination in deep-water. *IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(1):185-197.
19. Бреховских ЛМ, Лысанов ЮП. *Теоретические основы акустики океана*. М.: Наука, 2007, 370 с.
20. Kaznacheev IV, Kuz'kin VM, Kutsov MV, Lyakhov GA, Pereselkov SA. Interferometry in acoustic-data processing using extended

antennas. Space–time analogy. *Phys. Wave Phenom.*, 2020, 28(4):326-332.

21. Кузькин ВМ, Матвиенко ЮВ, Пересёлков СА, Казначеева ЕС. Интерферометрическая обработка с использованием вертикальной линейной антенны. *Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика*, 2020, 2:14-23.

**Кузькин Венедикт Михайлович**

*д.ф.-м.н.*

ИОФ им. А.М. Прохорова РАН

**38, ул. Вавилова, Москва 119991, Россия**

**E-mail: kumiov@yandex.ru**

**Пересёлков Сергей Алексеевич**

*д.ф.-м.н.*

Воронежский государственный университет

**1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия**

**E-mail: pereselkov@yandex.ru**

**Матвиенко Юрий Викторович**

*д.т.н.*

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

**5а, ул. Суханова, Владивосток 690091, Россия**

**E-mail: ymat@marine.febras.ru**

**Грачев Владимир Иванович**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

**11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия**

**E-mail: grachev@cplire.ru**

**Ткаченко Сергей Александрович**

*инженер*

Воронежский государственный университет

**1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия**

**E-mail: sega-th@mail.ru**

**Стадная Надежда Павловна**

*к.ф.-м.н.*

Воронежский государственный университет

**1, Университетская пл., Воронеж 394018, Россия**

**E-mail: stadnaya.edu@yandex.ru**



DOI: 10.17725/rensit.2023.15.179

## Проблемы масштабирования компонентов в системах потоковой обработки данных

Булычев Г.Г., Черных А.В.

МИРЭА-Российский технологический университет, <https://www.mirea.ru/>

Москва 119454, Российская Федерация

E-mail: [geo-bulychev@mail.ru](mailto:geo-bulychev@mail.ru), [meidm@yandex.ru](mailto:meidm@yandex.ru)

Поступила 24.04.2023, рецензирована 30.04.2023, принята 08.05.2023

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

**Аннотация:** Проводится рассмотрение существующих проблем масштабирования компонентов в системах потоковой обработки данных. Предлагаемый алгоритм значительно снижает количество операций создания и удаления компонентов при масштабировании системы. Алгоритм основан на линейной регрессии. Для предложенного алгоритма моделируется практическая нагрузка на систему для подтверждения полученных теоретических результатов.

**Ключевые слова:** потоковая обработка данных, масштабирование, большие данные

УДК 004.62

*Для цитирования:* Булычев Г.Г., Черных А.В. Проблемы масштабирования компонентов в системах потоковой обработки данных. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):179-184. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.179.

## The problems of scaling components in streaming data processing systems

George G. Bulychev, Alexey V. Chernykh

MIREA-Russian Technological University, <https://www.mirea.ru/>

Moscow 119454, Russian Federation

E-mail: [geo-bulychev@mail.ru](mailto:geo-bulychev@mail.ru), [meidm@yandex.ru](mailto:meidm@yandex.ru)

Received April 24, 2023, peer-reviewed April 30, 2023, accepted May 08, 2023

**Abstract:** The article examines the existing problems of scaling components in streaming data processing systems. The algorithm proposed by the authors significantly reduces the number of operations for creating and removing components when scaling the system. The algorithm is based on linear regression. For the proposed algorithm, the practical load on the system is simulated to confirm the theoretical results obtained.

**Keywords:** streaming data processing, scaling, big data

UDC 004.62

*For citation:* George G. Bulychev, Alexey V. Chernykh. The problems of scaling components in streaming data processing systems. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2023, 15(2):179-184e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.179.

### СОДЕРЖАНИЕ

#### 1. ВВЕДЕНИЕ (180)

#### 2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ (180)

##### 2.1. АЛГОРИТМ МАСШТАБИРОВАНИЯ С ПОРОГОВЫМ ЗНАЧЕНИЕМ (180)

#### 3. АЛГОРИТМЫ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ НАГРУЗКИ (180)

#### 3.1. АЛГОРИТМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ (181)

#### 3.2. АЛГОРИТМ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО СГЛАЖИВАНИЯ (181)

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ (181)

##### 4.1. КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ (181)

##### 4.2. КОНТЕКСТ МОДЕЛИРОВАНИЯ (182)

##### 4.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА С

пороговым значением (182)

#### 4.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО СГЛАЖИВАНИЯ (182)

#### 4.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ (183)

#### 4.6. ВЫВОДЫ ПО ИТОГАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ (183)

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (183)

#### ЛИТЕРАТУРА (183)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного информационного общества, характеризующегося гигантскими объемами данных [1], постоянно поступающими в режиме реального времени, актуальность и значимость потоковой обработки данных [2] неуклонно растет. Этот подход к обработке информации предполагает немедленный анализ и обработку данных, в отличие от классического подхода, с сохранением данных в хранилище и постобработкой.

Основным преимуществом систем потоковой обработки данных является возможность оперативного принятия решений на основе свежей и актуальной информации, что позволяет организациям и специалистам приспосабливаться к динамично меняющимся условиям и сохранять конкурентоспособность на рынке. Однако, вместе с ростом масштабов и сложности потоков обработки данных возникает ряд технических и концептуальных проблем. В частности, алгоритмы масштабирования компонентов в системах потоковой обработки данных сталкиваются с требованиями, связанными с эффективностью, надежностью и гибкостью.

Необходимость быстро и эффективно распределять ресурсы между узлами обработки данных создает проблемы в определении оптимального количества ресурсов для каждого узла, чтобы обеспечить высокую производительность и надежность системы. Неправильное масштабирование может привести к снижению производительности, дополнительным затратам на ресурсы и затруднению обработки данных в режиме реального времени.

### 2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ

В существующих системах потоковой обработки данных используется алгоритм масштабирования с пороговым значением [3] благодаря высокой скорости принятия решения.

#### 2.1. АЛГОРИТМ МАСШТАБИРОВАНИЯ С ПОРОГОВЫМ ЗНАЧЕНИЕМ

Алгоритм масштабирования с пороговым значением основан на определении пороговых значений нагрузки на узлы системы. Если нагрузка на узел превышает определенный порог, система автоматически масштабируется для распределения нагрузки.

Результатом работы алгоритма выступает количество сущностей компонента – величина, характеризующая необходимое число копий компонента для обработки поступающей нагрузки.

Количество сущностей компонента рассчитывается по формуле:

$$C_t = N_{t-1} / M, \quad (1)$$

где  $C_t$  – количество сущностей компонентов в момент времени  $t$ ,  $N_{t-1}$  – нагрузка на систему в момент времени  $t - 1$ ,  $M$  – пороговое значение нагрузки.

Как видно из формулы, алгоритм не прогнозирует нагрузку и оперирует только известными величинами. Данная особенность приводит к "отставанию" алгоритма от текущей нагрузки. При скачкообразном графике нагрузки система будет подстраиваться к нагрузке с отставанием, производя излишнее количество операций создания и удаления сущностей компонентов.

### 3. АЛГОРИТМЫ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ НАГРУЗКИ

Для эффективного масштабирования компонентов необходимо снизить количество операций создания и удаления сущностей компонентов. Для выполнения данного требования необходимо реализовать алгоритм прогнозирования нагрузки. Проблему прогнозирования нагрузки можно свести к проблеме прогнозирования временных рядов

(так как нагрузка напрямую связана с временным рядом).

Однако в контексте существующей задачи алгоритм должен иметь минимальное время задержки принятия решения и использовать минимальное число ресурсов. В противном случае алгоритм будет работать с сильным запозданием или со значительным повышением потребления ресурсов, тем самым нивелируя экономию, вызванную снижением числа операций создания или удаления сущностей компонентов.

Данные особенности не позволяют использовать алгоритмы, основанные на нейронных сетях [4], случайном лесе [5] и большинство других алгоритмов машинного обучения [6,7]. Однако алгоритм линейной регрессии [8] и экспоненциального сглаживания [9] подпадают под данные требования.

### 3.1. АЛГОРИТМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Линейная регрессия — это статистический метод машинного обучения, используемый для моделирования связи между зависимой переменной и одной или несколькими независимыми переменными. В контексте прогнозирования нагрузки зависимая переменная может быть нагрузкой на систему, а независимые переменные — факторы, влияющие на нагрузку (например, время суток, день недели, объем трафика).

Математически линейная регрессия описывается как:

$$\begin{aligned} C_{t+1} &= \frac{\bar{Y}_{t+1}}{M}, \\ \bar{Y}_{t+1} &= \delta \cdot N_t + \varepsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $C_{t+1}$  — количество сущностей компонентов в момент времени  $t + 1$ ,  $\bar{Y}_{t+1}$  — прогнозируемая нагрузка в момент времени  $t + 1$ ,  $M$  — пороговое значение нагрузки,  $N_t$  — нагрузка на систему в момент времени  $t$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$  — коэффициенты регрессии.

Подбор значения коэффициентов линейной регрессии производится методом наименьших квадратов.

### 3.2. АЛГОРИТМ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО СГЛАЖИВАНИЯ

Экспоненциальное сглаживание — это метод прогнозирования временных рядов, который учитывает все наблюдения в прошлом, присваивая им экспоненциально убывающие веса. Таким образом, более новые наблюдения имеют большее влияние на прогноз, чем старые.

Для решения существующей задачи оптимальным будет алгоритм тройного экспоненциального сглаживания (метод Хольта-Винтерса [10]), так как данный алгоритм учитывает тренды и сезонность, а для большинства обрабатываемых сообщений характерны данные особенности.

Математически алгоритм описывается как:

$$\begin{aligned} C_{t+h} &= \frac{\bar{Y}_{t+h}}{M}, \\ \bar{Y}_{t+h} &= A(t) + h \cdot B(t) + S(t - p + 1 + (h - 1) \bmod p), \\ A(t) &= \alpha \cdot (N_t - S(t - p)) + (1 - \alpha) \cdot (A(t - 1) + B(t - 1)), \\ B(t) &= \beta \cdot (A(t) - A(t - 1)) + (1 - \beta) \cdot B(t - 1), \\ S(t) &= \gamma \cdot (N_t - A(t)) + (1 - \gamma) \cdot S(t - p), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $C_{t+h}$  — количество сущностей компонентов в момент времени  $t + h$ ,  $\bar{Y}_{t+h}$  — прогнозируемая нагрузка в момент времени  $t + 1$ ,  $M$  — пороговое значение нагрузки,  $N_t$  — нагрузка на систему в момент времени  $t$ ,  $A$  — уравнение, описывающее сглаженный ряд,  $B$  — уравнение для оценки тренда,  $S$  — уравнение для оценки сезонности,  $\alpha$  — постоянная величина, определяющая влияние сглаженного ряда,  $\beta$  — постоянная величина, определяющая влияние тренда,  $\gamma$  — постоянные величины, определяющие влияния сезонности,  $p$  — период сезонности.

Для функционирования алгоритма необходимо определить постоянные величины. Однако для большинства компонентов невозможно их оценить заранее.

## 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 4.1. КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Использование алгоритма должно приводить к:

- снижению количества операций создания и удаления компонентов;
- снижению задержки в обработке сообщений с момента поступления в очередь. Для систем



поточковой обработки данных критически важным параметром является время обработки каждого сообщения;

- снижению максимального и среднего размера очереди. Моделирование системы проводится на примере одного компонента, однако в целевой системе количество компонентов и очередей может исчисляться тысячами и при значительном росте размера очереди каждого компонента суммарное потребление памяти системой может нивелировать экономию ресурсов, полученную за счет снижения количества операций масштабирования.

Целевой алгоритм должен показать минимальное значение указанных параметров при моделировании.

Алгоритм должен использовать минимальные ресурсы для прогнозирования нагрузки.

Для оценки всех вышеперечисленных параметров выбраны следующие метрики:

- Количество операций создания и удаления сущностей компонентов.
- Среднее время задержки обработки сообщения.
- Максимальный размер очереди.
- Средний размер очереди.
- Изменение объема потребляемой памяти.

#### 4.2. КОНТЕКСТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим систему, состоящую из одного компонента – обработчик сообщений в публичных репозиториях кода ( $A1$ ) и очереди ( $Q1$ ), в которую поступают сообщения для обработки (Рис. 1). Обработка данных сообщений позволяет выявить утечки исходного

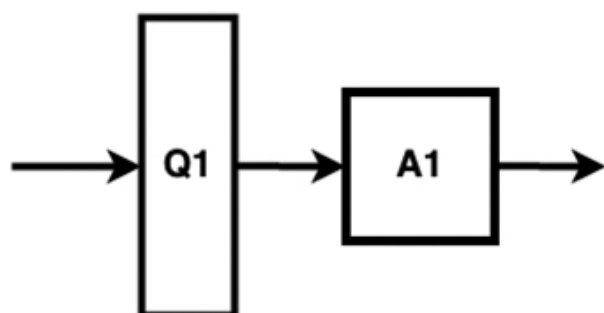


Рис. 1. Система обработки с очередью.

Таблица 1

Параметры моделирования	
Параметр	Значение
Производительность $A1$	50 сообщений в секунду
Суммарное количество сообщений	30 715 323
Время запуска или удаления сущностей	1 секунда

кода или конфиденциальной информации компаний.

В процессе моделирования каждый алгоритм получает информацию о текущей нагрузке и возвращает количество сущностей компонентов, которые необходимо запустить или удалить в следующий момент времени.

В качестве источника нагрузки выбраны события на github.com за период с 2022-01-01 15:00:00 до 2022-01-12 02:51:46.

Дополнительные параметры моделирования отражены в Таблице 1.

#### 4.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА С ПОРОГОВЫМ ЗНАЧЕНИЕМ

При моделировании алгоритма с пороговым значением потребление памяти было фиксировано.

В результате моделирования (Таблица 2) была достигнута минимальная задержка в обработке сообщений при, однако, колоссальном числе операций создания и удаления компонентов.

#### 4.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО СГЛАЖИВАНИЯ

Для моделирования алгоритма необходимо определить три константы:

- влияние сглаженного ряда;
- влияние тренда;
- влияние сезонности.

Таблица 2

Результаты моделирования алгоритма с пороговым значением

Параметр значение	Количество операций
Количество операций масштабирования	81 746 850
Средний размер очереди	3.534165161
Среднее время задержки сообщений	0.156226077
Максимальный размер очереди	140

**Таблица 3**  
Результаты моделирования алгоритма экспоненциального сглаживания

Параметр значение	Количество операций
Количество операций масштабирования	148 122 776
Средний размер очереди	10.47011898
Среднее время задержки сообщений	0.46282659
Максимальный размер очереди	415

Однако до формирования нагрузки и анализа корректно определить данные параметры невозможно. Для моделирования были выбраны случайным образом следующие значения:

- влияние сглаженного ряда – 0.4;
- влияние тренда – 0.1;
- влияние сезонности – 0.02.

В результате моделирования алгоритма потребление памяти было фиксировано.

Алгоритм показал результаты (Таблица 3) значительно хуже, чем алгоритм с пороговым значением. Количество операций выше в 1.8 раз, а средняя задержка больше чем в два раза по сравнению с алгоритмом с пороговым значением.

#### 4.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

При моделировании алгоритма линейной регрессии потребление памяти было фиксировано.

Алгоритм показал (Таблица 4) снижение числа операций создания и удаления компонентов более чем в 740 раз. Однако время задержки сообщений и размер очереди возросли. Полученный результат можно объяснить тем, что алгоритм проводит эффективное сглаживание всплесков и спадов

**Таблица 4**  
Результаты моделирования для линейной регрессии

Параметр значение	Количество операций
Количество операций масштабирования	109 596
Средний размер очереди	7.624188911
Среднее время задержки сообщений	0.337023616
Максимальный размер очереди	539

нагрузки к среднему значению и корректно определяет тенденции.

#### 4.6. ВЫВОДЫ ПО ИТОГАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Алгоритм с экспоненциальным сглаживанием неприменим для данной задачи, так как для корректной работы необходимо строго определить начальные константы.

Алгоритм линейной регрессии показал значительно снижение числа операций создания и удаления компонентов, по сравнению с классическим алгоритмом с пороговым значением: 109 596 против 81 746 850 операций. Однако увеличивается время задержки сообщений с 0.156 до 0.337 секунды.

Использование алгоритма линейной регрессии позволяет достичь значительного снижения потребляемых ресурсов с минимальным увеличением времени задержки.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование алгоритма линейной регрессии для масштабирования компонентов позволяет значительно снизить число операций создания и удаления компонентов (более чем в 700 раз), однако увеличивается задержка в обработке сообщений. Данную особенность можно нивелировать добавлением временного окна, на основе которого будет производиться прогнозирование нагрузки.

При использовании предложенного алгоритма для прогнозирования нагрузки и алгоритма маркировки [11] для маршрутизации сообщений в системе потоковой обработки данных возможно достичь снижения количества операций масштабирования компонентов более чем в 800 раз.

Предложенные алгоритмы могут быть встроены в системы, построенные на микросервисной [12] архитектуре. Благодаря разработанным алгоритмам потребление ресурсов значительно снижается как при обработке больших объемов данных, так и при решении прикладных задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Volume of data/information created, captured, copied, and consumed worldwide from 2010 to 2020, with forecasts from 2021 to 2025 //

- <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/> (дата обращения: 24.04.2023)
2. Loshin D. *ETL (Extract, Transform, Load): Business Intelligence*. USA, Silver Spring, Morgan Kaufmann Publ., 2012, 400 p.
  3. Chandrima R, Kashyap B, Sandeep A, Manjusha P. Horizontal Scaling Enhancement for Optimized Big Data Processing: *Proceedings of IEMIS. Emerging Technologies in Data Mining and Information Security*, 2019, 639-649 p.p. DOI: 10.1007/978-981-13-1951-8\_58.
  4. Oancea B, Ciucu S. Time series forecasting using neural network. [//https://arxiv.org/pdf/1401.1333.pdf](https://arxiv.org/pdf/1401.1333.pdf) (дата обращения: 24.04.2023)
  5. Random Forests for Time Series [//https://hal.science/hal-03129751/file/Block\\_bootstrap\\_for\\_random\\_forests.pdf](https://hal.science/hal-03129751/file/Block_bootstrap_for_random_forests.pdf) (дата обращения: 24.04.2023)
  6. Machine Learning Algorithms for Time Series Analysis and Forecasting [//https://arxiv.org/abs/2211.14387](https://arxiv.org/abs/2211.14387) (дата обращения: 24.04.2023)
  7. Gianluca B, Souhaib B, Yann-Aël B. Machine Learning Strategies for Time Series Forecasting. *Lecture Notes in Business Information Processing 138*, 2013, 62-77 p.p. DOI: 10.1007/978-3-642-36318-4\_3.
  8. Dastan H, Adnan M. A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2020, 140-147 p.p. DOI: 10.38094/jastt1457.
  9. Handanhal V. Forecasting With Exponential Smoothing – What’s The Right Smoothing Constant? *Review of Business Information Systems*, 2013, 117-126 p.p. DOI:10.19030/rbis.v17i3.8001.
  10. Chatfield C. The Holt-Winters Forecasting Procedure. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1978, 264-279 p.p. DOI: 10.2307/2347162.
  11. George G. Bulychev, Alexey V. Chernykh. Problems of Message Routing Algorithms in Streaming Data Processing Systems. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2022, 14(3):279-290e. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.279.
  12. Al-Debagy O, Martinek P. A Comparative Review of Microservices and Monolithic Architectures. *18th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, 2018. DOI: 10.1109/CINTI.2018.8928192.

**Булычев Георгий Гаврилович**

*доктор физ.-мат. наук, профессор*

МИРЭА-Российский технологический университет

**78, просп. Вернадского, Москва 119454, Россия**

**E-mail: geo-bulychev@mail.ru**

**Черных Алексей Валерьевич**

*аспирант*

МИРЭА-Российский технологический университет

**78, просп. Вернадского, Москва 119454, Россия**

**E-mail: meidm@yandex.ru.**



DOI: 10.17725/rensit.2023.15.185

## Применение химерных сеток для явного учета неоднородностей при моделировании распространения

### упругих волн

Митьковец И.А.

Московский физико-технический институт, <https://mipt.ru/>  
г. Долгопрудный 141701, Московская область, Российская Федерация  
E-mail: [mitkovets@phystech.edu](mailto:mitkovets@phystech.edu)

Поступила 09.05.2023, рецензирована 16.05.2023, принята 23.05.2023

Представлена действительным членом РАЕН И.Б. Петровым

**Аннотация:** Метод химерных сеток применен для моделирования распространения упругих возмущений в средах, содержащих поровые и трещиноватые включения. Рассматривается модель линейно упругой изотропной среды, которой описывается состояние геологической породы. Для численного моделирования динамического распространения упругих возмущений применяется сеточно-характеристический метод со схемой Рузанова третьего порядка точности. Особое внимание уделяется присутствию отдельных включений пор или трещин, которые вносят неоднородность в среду и могут существенно влиять на отклик упругих возмущений. Использование метода химерных сеток позволяет описать как положение, так и форму таких включений с явным учетом их влияния на распространение упругих возмущений. Получена методика численного моделирования распространения упругих возмущений в средах с поровыми и трещиноватыми включениями, которая может быть использована для оценки влияния таких включений на динамический отклик упругих возмущений. Представленные результаты могут быть применены в геофизических и сейсмических исследованиях, связанных с моделированием динамики различных процессов в грунтах и горных породах.

**Ключевые слова:** сеточно-характеристический метод, химерные сетки, упругая волна, поры, трещины

УДК 519.633.2

**Для цитирования:** Митьковец И.А. Применение химерных сеток для явного учета неоднородностей при моделировании распространения упругих волн. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):185-192. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.185.

## Application of Chimeric Meshes for Explicit Accounting for Inhomogeneities in Modeling the Propagation of Elastic Waves

Ivan A. Mitskovets

Moscow Institute of Physics and Technology, <https://mipt.ru/>  
Dolgoprudny 141701, Moscow Region, Russian Federation  
E-mail: [mitkovets@phystech.edu](mailto:mitkovets@phystech.edu)

Received May 09, 2023, peer-reviewed May 16, 2023, accepted May 23, 2023

**Abstract:** The method of chimeric meshes is applied to simulate the propagation of elastic perturbations in media containing porous and fractured inclusions. A model of a linearly elastic isotropic medium is considered, which describes the state of a geological rock. The grid-characteristic method with the third-order accurate Rusanov scheme is used for numerical modeling of the dynamic propagation of elastic disturbances. Special attention is paid to the presence of separate inclusions of pores or fractures, which introduce heterogeneity into the medium and can

substantially influence the response of elastic disturbances. The use of the chimera grid method allows for both the position and shape of such inclusions to be described explicitly, taking into account their influence on the propagation of elastic disturbances. As a result of the conducted investigation, a methodology for numerical modeling of the propagation of elastic disturbances in media with porous and fractured inclusions was developed, which can be used to assess the influence of such inclusions on the dynamic response of elastic disturbances. The presented results can be applied in geophysical and seismic research related to modeling the dynamics of various processes in soils and rocks.

*Keywords:* grid-characteristic method, chimera grids, elastic wave, pores, cracks

UDC 519.633.2

*For citation:* Ivan A. Mitskovets. Application of Chimeric Meshes for Explicit Accounting for Inhomogeneities in Modeling the Propagation of Elastic Waves. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):185-192e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.185.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (186)
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (187)
3. ТРЕЩИНЫ (187)
4. ПОРЫ (189)
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (191)

## ЛИТЕРАТУРА (191)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая разведка является одним из старейших и распространенных методов поиска и разведки месторождений углеводородов. Основным ее предназначением является определение структуры подповерхностного пространства на основе наземных и скважинных данных наблюдений. Однако не менее важным элементом этого метода является описание процесса распространения сейсмических волн от источника внутрь геологической среды. Это позволяет решать такие задачи, как уточнение запасов углеводородов в районах с высокой скважинной активностью, генерация синтетических сейсмограмм для региональных исследований, а также уточнение наличия и характеристик углеводородов в известных геологических структурах. Значительный прогресс в этой области достигается при использовании численного моделирования распространения сейсмических волн в надежных геологических моделях, так как это позволяет создавать произвольные внутренние структуры среды и оценивать синтетический сигнал-отклик.

В настоящей работе рассматривается метод изучения пространственных динамических

процессов, происходящих в геологических средах с пористыми и трещиноватыми включениями в процессе сейсмической разведки. Для численного интегрирования возникающих систем дифференциальных уравнения в частных производных применяется сеточно-характеристический метод [1,2].

Геологические породы, содержащие пористые и трещиноватые включения, являются одним из основных источников углеводородов, однако понимание их структуры и свойств остается сложной задачей для геологов. Это связано с тем, что подобные структуры имеют комплексную геометрию и их свойства могут изменяться в зависимости от многих факторов, таких как комбинация пористости, проницаемости и плотности пор. Одной из задач, которую можно решить с помощью изучения динамических процессов в геологических средах с пористыми и трещиноватыми включениями, является определение оптимальных мест для добычи углеводородов. Развитая сеть микротрещин и относительно высокая пористость играют важную роль в добыче природного газа в плотных газоносных песчаниковых коллекторах. Эти структуры могут быть использованы для контролируемого хранения и миграции газа благодаря их низкой пористости и проницаемости [3].

Одновременно с этим, развитие природных микротрещин способствует формированию сети пор-трещин при гидроразрыве пласта, что также является важным фактором в добыче углеводородов. Рассеивание волны на пористых

неоднородностях вносит значительные изменения в характер распространения упругих волн, что было показано в [4].

Классические работы, в построении которых считается, что поры равно распределены по объему, такие как модели Гассмана или Био [5,6,7], не позволяют учитывать всех особенностей распределения пористых включений. Это обуславливает необходимость создания моделей, которые позволяют описывать физические свойства подобных структур с максимальной точностью, описывая их форму [8,9] и включая сейсмические характеристики пор и микротрещин. Решение обратной задачи на основе сейсмических данных является одним из способов создания таких моделей. Этот подход позволяет создать модель геологического устройства под поверхностью и определить оптимальные места для бурения скважин. Использование моделей, учитывающих различные физические свойства пор и микротрещин, позволяет предсказывать и детектировать проявления, связанные с добычей углеводородов, и управлять такими процессами.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Концепция химерных (смещенных, наложенных, перекрывающихся) сеток возникла из потребности в моделировании многокомпонентных систем, в которых каждый компонент требует оптимальную сетку, адаптированную под его форму. Путем реализации произвольного перекрытия между соседними сетками в перекрывающей системе каждая сетка может быть сгенерирована независимо. Акцент при создании сетки может быть сосредоточен на поддержании высокого качества ячеек, таких как ортогональность и размер ячеек. Гибкость данного подхода обычно приводит к значительно лучшему качеству сеток в сравнении с иерархическими сетками, где точки сеток на границах соседних зон должны полностью совпадать. Кроме того, подход перекрывающихся сеток позволяет определить локальные изменения геометрии, такие как добавление или удаление компонентов, без необходимости полной перестройки сеточной системы.

При применении метода химерных сеток, который может включать в себя различные численные методы, включая сеточно-характеристический метод, для решения задач, связанных с расчетом физических параметров, описывающих поведение среды в последующие моменты времени, возможно производить вычисления независимо в основной вычислительной сетке и в химерных сетках на каждом временном шаге в отдельности. После завершения моделирования распространения возмущений на данном временном шаге во всех химерных и основных сетках, необходимо произвести интерполяцию значений физического состояния среды из химерных сеток в основные сетки, которые пересекаются с ними. Это необходимо для возможности учета влияния неоднородностей, описываемых этими химерными сетками, при произведении расчета на следующем временном шаге [10].

В дальнейшем, следующий временной шаг начинается с интерполяции из основной сетки в приграничные узлы химерных сеток, которые пересекаются с основной сеткой. Таким образом, достигается моделирование взаимодействия различных областей, описываемых химерными сетками, с прочими частями моделируемой области. Этот подход предназначен для достижения большей точности при проведении вычислений, особенно в случаях, когда область расчетов содержит неоднородные участки, расположенные в различных местах моделируемой области.

## 3. ТРЕЩИНЫ

Для представления трещиноватой среды были использованы регулярные прямоугольные сетки. Сплошная среда была описана одной прямоугольной сеткой, а трещины были заданы при помощи наложенных прямоугольных сеток, соосных описываемым трещинам. Используемый метод расчета прямой трещины на регулярной прямоугольной сетке и его реализация применительно к сеточно-характеристическому методу, был описан в статье [11]. Наложённая регулярная прямоугольная сетка была необходима для учета трещины соосной повернутой сетке. Таким образом в предлагаемом методе необходимо использовать



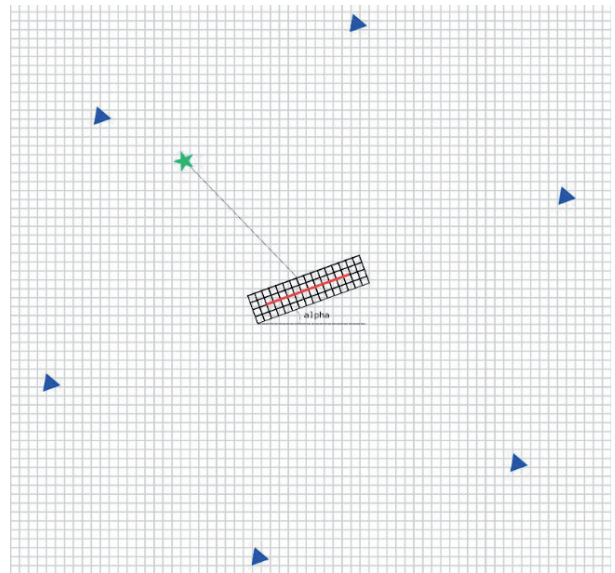
количество наложенных сеток, равное количеству учитываемых трещин.

Однако существует другой способ задания повернутой трещины, который не требует использования наложенных сеток. Этот метод работает путем замены одной трещины на множество малых трещин, привязанных к узлам основной сетки, и был также описан в [12,13]. Несмотря на то, что оба метода обеспечивают достаточную точность расчетов, использование множества малых трещин может привести к увеличению количества вычислительных операций, и в некоторых случаях, может вносить дополнительную ошибку, связанную с "лестничной структурой" трещины, описываемой подобным методом. Таким образом, выбор между этими методами может зависеть от конкретных условий и требуемой точности расчетов.

Для проверки корректности работы метода были выполнены ряд тестовых расчетов моделирования распространения волновых возмущений, происходящих от точечного источника частотой  $f = 15$  Hz, для различных углов поворота модели трещины. Углом поворота трещины считается угол между осями  $Ox$  наложенной и основной сеток. Создаваемые источником возмущения описываются импульсом Риккера.

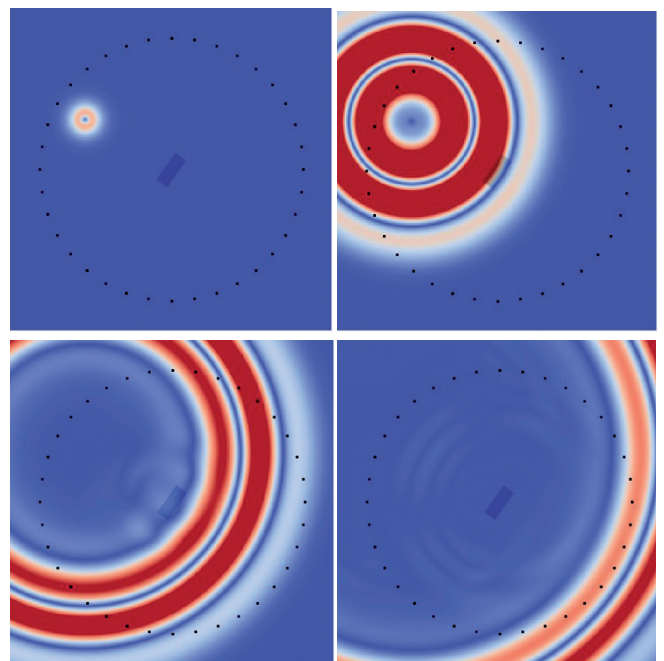
В ходе расчетов для моделирования сплошной среды использовалась регулярная прямоугольная сетка размером  $700 \times 700$  узлов, каждый размером 2 м. Для моделирования повернутых трещин были использованы повернутые регулярные прямоугольные сетки размера  $32 \times 13$  узлов, состоящие из ячеек 2 м. Характеристики сплошной среды были следующие: плотность  $\rho = 400$  кг/м<sup>3</sup>; продольная скорость упругой волны  $C_p = 2850$  м/с; поперечная скорость  $C_s = 1650$  м/с.

В работе было проведено моделирование распространения динамических волновых возмущений в течение с шагом по времени  $dt = 0.3$  мс в течении 0.75 секунд. Схема постановки в серии тестовых расчетов для различных углов поворота трещины относительно осей основной сетки представлена на **Рис. 1**, в данной серии переменным является угол  $\alpha$  на Рис. 1. Угол между нормалью к трещине и отрезком от центра



**Рис. 1.** Серыми линиями обозначены ребра основной сетки, черными ребра наложенной. Синие треугольники обозначают положения приемников, зеленой звездой – положение источника упругих волн.

трещины к источнику остается неизменным и составляет  $5^\circ$ . При этом от расчета к расчету положение источника остается неизменным, а система наложенная сетка-трещина-приемники, вращается относительно источника. Визуализации распространения напряжения в среде, в условиях описываемого расчета для  $\alpha = 55^\circ$  в виде волновых картин представлена на **Рис. 2**.



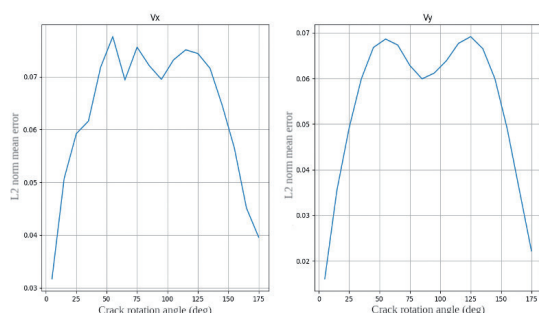
**Рис. 2.** Волновые картины напряженности среды, содержащей повернутую трещину, описываемую при помощи наложенной сетки при наличии точечного источника упругой волны.



В качестве меры, позволяющей оценить корректность предложенного метода моделирования единичной трещины при различных углах поворота, использовалась усредненная ошибка по норме  $L_2$ , рассчитываемая для всех приемников на протяжении всего периода моделирования. Для сравнения результатов были использованы эталонные данные, полученные при повороте трещины на угол  $\alpha = 0^\circ$ . Графическое представление зависимости ошибки для различных компонент тензора напряженности среды можно увидеть на **Рис. 3**.

Результаты показали, что метод достаточно точен при моделировании трещины при малых углах поворота трещины относительно осей основной сетки, но при более крутых углах требуются дополнительные исследования для уточнения точности метода. Необходимо подчеркнуть, что максимальное значение полученной нами погрешности для обеих компонент напряженности не превышает 0.08, демонстрируя эффективность предлагаемого нами метода

Была проведена проверка корректности работы метода при моделировании единичной трещины для различных углов поворота относительно осей основной сетки. Результаты показали, что метод дает достаточно точные результаты в этом случае. Однако, для убедительного подтверждения способностей метода в более широком диапазоне условий, необходимы дополнительные исследования. В частности, следует рассмотреть моделирование нескольких трещин, взаимодействующих друг с другом, а также моделирование трещин при различных углах между нормалью трещины и направлением на источник.

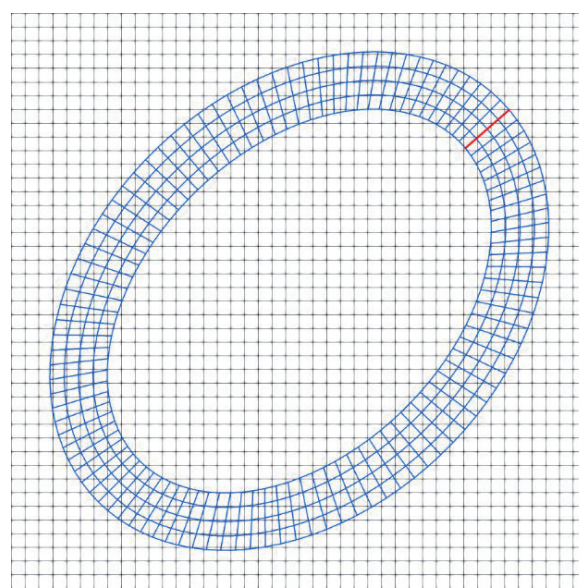


**Рис. 3.** Средняя ошибка по норме  $L_2$  по всем приемникам от угла поворота трещины.

#### 4. ПОРЫ

Для точного моделирования распространения упругих волн с полыми отверстиями был предложен метод наложенных сеток [14]. Он позволяет описать свободную границу отверстия круглой или овальной формы, образовав кольцевую криволинейную сетку. Это достигается путем взаимно однозначного преобразования равномерной регулярной сетки в криволинейную, состоящую из кольца узлов. В узлах сетки на перпендикулярных ей границах были применены периодические граничные условия. Эти границы, помеченные красным цветом на **Рис. 4**, полностью совпадают и замыкают сетку в кольцо, что позволяет моделировать распространение возмущения в узлах на этих границах в любом направлении аналогично внутренним узлам сетки.

Периодические граничные условия реализованы таким образом, что для узлов, находящихся близко к одной из границ, соседями являются также узлы, находящиеся у противоположной границы. Внешняя сторона такой "закольцованной" сетки граничных условий не имеет. Реализация периодических граничных условий позволяет описывать полые отверстия равносторонним многоугольником, который образуется на внутренней стороне наложенной сетки. В отличие от ломаной,



**Рис. 4.** Черными линиями обозначены ребра основной сетки, синими ребра наложенной. Красная линия обозначает положение торцов наложенной сетки, обладающих периодическими граничными условиями.

состоящей из перпендикулярных друг другу отрезков, совпадающих с ребрами основной регулярной сетки, при использовании "лестничного" описания границы регулярной сеткой, такой метод является более точным и корректным.

Граница наложенной сетки, являющаяся внутренней границей кольца, используется для определения граничных условий свободной поверхности, которые формируют стенку полого отверстия. Таким образом, можно производить моделирование распространения упругих волн в среде, в которой присутствуют полые поровые включения различных овальных форм, частным случаем которых, являются круглые поры. Волновые картины, получаемые в результате моделирования взаимодействия упругой волны с отверстием овальной формы реализованным предлагаемым методом, приведены на **Рис. 5**.

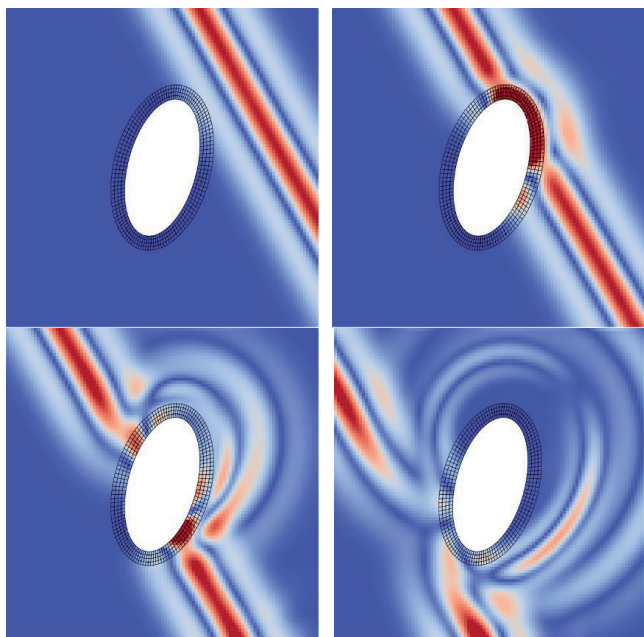
Для проверки верности использования нашего метода при моделировании распространения упругих волн в неоднородной среде через единичные отверстия была проведена серия расчетов. Они позволили проверить симметрию реализации системы наложенной сетки и основной сетки в случае применения периодического граничного

условия на замкнутых границах наложенной сетки, образующей кольцо вокруг отверстия.

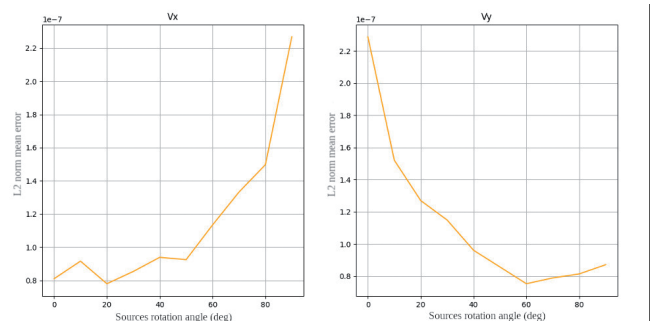
Для численной оценки мы провели серию расчетов в квадратной области в условии наличия круглого отверстия. Характеристики сплошной среды были следующие: плотность  $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ ; продольная скорость упругой волны  $C_p = 3000 \text{ м/с}$ ; поперечная скорость  $C_s = 1500 \text{ м/с}$ . В работе было проведено моделирование распространения динамических волновых возмущений в течение с шагом по времени  $dt = 0.2 \text{ мс}$  в течении 0.12 секунд.

Основная сетка представляет собой квадратную равномерную сетку размером  $450 \times 450$  узлов по 1.8 м каждый, наложенная сетка также представлена квадратной равномерной сеткой размером  $119 \times 5$  узлов, размером 1.8 м. Кроме того, мы расположили 72 приемника на расстоянии 12 метров от внешнего края наложенной сетки. Затем мы наложили на описанное отверстие две плоские волны с частотой 100 Hz, симметрично относительно прямой, проходящей через центр отверстия под переменным углом. В результате данного расчета была вычислена сумма ошибок принятого приемниками сигнала по норме  $L_2$  в течение всего периода моделирования. Результаты расчета данной метрики для различных углов между прямой, параллельной плоскостям падающих волн и осью  $Ox$ , представлены на **Рис. 6**.

Как видно из графика представленного на Рис. 6, ошибка для различных компонент тензора напряженности, растет при различных углах. Такая зависимость объясняется



**Рис. 5.** Волновые картины напряженности среды содержащей полое отверстие эллиптической формы при прохождении плоской упругой волны.



**Рис. 6.** График зависимости накопленной ошибки по норме  $L_2$  от различных углов между фронтом падающей волны и осью основной сетки.

особенностями используемого численного метода при моделировании распространения упругих возмущений продольных осей основной вычислительной сетки. Проведенные расчеты показали высокую точность нашего метода при моделировании распространения упругих волн в среде в присутствии круглой неоднородности. Полученные данные демонстрируют, что наш метод можно применять для решения сложных задач, связанных с моделированием упругих волн в пористых средах.

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен метод наложенных сеток в сочетании со сеточно-характеристическим методом для моделирования распространения упругих волн в неоднородной среде с различными неоднородностями, такими как трещины и поры. Помимо описания реализации предлагаемого метода подробно рассмотрены способы валидации применимости метода наложенных сеток. Продемонстрированы результаты валидации предложенного метода, при этом в результате тестовых расчетов оценена точность предлагаемого метода.

Обнаружено, что предложенный метод обеспечивает высокую точность при моделировании распространения упругих волн через упругую среду, имеющую такие неоднородности как трещины и поры. Важным выводом является то, что представленный метод может быть использован в различных областях, связанных с моделированием упругих волн в неоднородной среде, и его потенциал может быть раскрыт в будущих исследованиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Favorskaya AV, Zhdanov MS, Khokhlov NI, Petrov IB. Modelling the wave phenomena in acoustic and elastic media with sharp variations of physical properties using the grid-characteristic method. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66(8):1485-1502.
2. Petrov IB, Khokhlov NI. Modeling 3D seismic problems using high-performance computing systems. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2014, 8:342-350.
3. Qi Y, Chen X, Zhao Q, Luo X, Feng C. Seismic wave modeling of fluid-saturated fractured porous rock: Including fluid pressure diffusion effects of discrete distributed large-scale fractures. *EGU Sphere*, 2023, 1-26 p. DOI:10.5194/egusphere-2022-1388.
4. Liu J, Wei XC, Ji YX, Chen TS, Liu CY, Zhang CT, Dai MG. An analysis of seismic scattering attenuation in a random elastic medium. *Applied Geophysics*, 2021, 8(4):344-354. DOI:10.1007/s11770-011-0296-y.
5. Biot MA. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2):168-178.
6. Berryman JG. Origin of Gassmann's equations. *Geophysics*, 1999, 64(5):1627-1629. DOI: 10.1190/1.1444667.
7. Gassmann F. On elasticity of porous media. *Classics of Elastic Wave Theory*, 2007, pp. 389-408.
8. Li T, Wang Z, Yu N, Wang R, Wang Y. Numerical study of pore structure effects on acoustic logging data in the borehole environment. *Fractals*, 2020, 28(3):2050049-518. DOI: 10.1142/S0218348X20500498.
9. Cho Y, Gibson RL, Vasilyeva MV, Efendiev Y. Generalized multi-scale finite elements for simulation of elastic wave propagation in fractured media. *Geophysics*, 2017, 83(1):WA9-WA20. DOI: 10.1190/geo2017-0076.1.
10. Petrov IB, Khokhlov NI. Modeling 3D seismic problems using high-performance computing systems. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2014, 6(4):342-350. DOI: 10.1134/S2070048214040061.
11. Khokhlov N, Favorskaya A, Stetsyuk V, Mitskovets I. Grid-characteristic method using Chimera meshes for simulation of elastic waves scattering on geological fractured zones. *Journal of Computational Physics*, 2021, 446(1):110637. DOI: 10.1016/j.jcp.2021.110637.
12. Khokhlov N, Stognii P. Novel Approach to Modeling the Seismic Waves in the Areas with Complex Fractured Geological Structures. *Minerals*, 2020, 10(2):122. DOI: 10.3390/min10020122.

13. Stognii P, Khokhlov N, Zhdanov M. Novel approach to modelling the elastic waves in a cluster of subvertical fractures. *81st EAGE Conference and Exhibition*, 2019, 1:1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.201901014.
14. Khokhlov NI, Stetsyuk VO, Mitskovets IA. Overset grids approach for topography modeling in elastic-wave modeling using the grid-characteristic method. *Computer Research and Modeling*, 2019, 11(6):1049-1059.

**Митьковец Иван Анатольевич**  
*аспирант*  
Московский физико-технический институт  
Догопрудный 141707, Московская обл., Россия  
E-mail: mitkovets@phystech.edu



DOI: 10.17725/rensit.2023.15.193

## Расчет движения подвижного состава по железнодорожному пути сеточно-характеристическим методом

<sup>1,2</sup>Кожемяченко А.А.

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, <https://mipt.ru/>

г. Долгопрудный 141700, Московская область, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, <https://www.niisi.ru/>

Москва 117218, Российская Федерация

E-mail: [anton-kozhemyachenko@yandex.ru](mailto:anton-kozhemyachenko@yandex.ru)

Поступила 04.05.2023, рецензирована 11.05.2023, принята 18.05.2023

Представлена действительным членом РАЕН И.Б. Петровым

**Аннотация:** Для численного моделирования движения подвижного состава по железнодорожному пути, проложенному по земляному полотну и мосту, предложено использовать сеточно-характеристический метод. Железнодорожный путь представлен с использованием динамической системы уравнений теории упругости гиперболического типа. Сеточно-характеристический метод опирается на характеристические свойства рассматриваемой системы и использует конечно-разностные схемы высокого порядка точности для получения пространственно-временного решения. Особенности железнодорожных конструкций учитываются путем изменения граничных условий и условий на контактных границах. Для расчета поведения участков контакта колесных пар подвижного состава с рельсом – системы "колесо-рельс" – использовано ранее разработанное граничное условие, модифицированное так, чтобы учитывать многоэлементные подвижные составы. В результате компьютерного моделирования движения подвижного состава по железнодорожному пути различного типа получены полноволновые картины распределения напряжений в конструкции пути, что позволяет прогнозировать опасные участки движения подвижного состава.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, сеточно-характеристический метод, колесо-рельс, подвижной состав, железнодорожный путь

УДК 519.63

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2022-0005 "Математическое моделирование динамических процессов в деформируемых и реагирующих средах с использованием многопроцессорных вычислительных систем", Рег. № 1021060708369-1-1.2.1.

**Для цитирования:** Кожемяченко А.А. Расчет движения подвижного состава по железнодорожному пути сеточно-характеристическим методом. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023 15(2):193-198. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.193.

## Calculation of rolling stock movement along the railway track by the grid-characteristic method

<sup>1,2</sup>Anton A. Kozhemyachenko

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, <https://mipt.ru/>

Dolgoprudny 141700, Moscow region, Russian Federation

<sup>2</sup>Scientific Research Institute of System Analysis of RAS, <https://www.niisi.ru/>

Moscow 117218, Russian Federation

E-mail: [anton-kozhemyachenko@yandex.ru](mailto:anton-kozhemyachenko@yandex.ru)

Received May 04, 2023, peer-reviewed May 11, 2023, accepted May 18, 2023

**Abstract:** The application of a grid-characteristic method is proposed for numerical simulation of the movement of rolling stock along a railway track laid on an earth and a bridge. In the study, the railway track is presented using a dynamic system of equations of the theory of elasticity of hyperbolic type. The grid-characteristic method relies on the characteristic properties of the system under consideration and uses finite-difference schemes of high order of accuracy to obtain a space-time solution. The features of railway structures are considered by changing the boundary conditions and conditions at the contact borders. To simulate the areas of contact of wheel pairs of rolling stock with the rail – the "wheel-rail" system – a previously developed pressure boundary condition is applied, modified so as to consider multi-element rolling stock. As a result of computer simulation of the movement of rolling stock along the railway track of various types, full-wave stress distribution in the track structure is obtained, which makes it possible to predict dangerous sections of rolling stock movement.

**Keywords:** computer simulation, grid-characteristic method, wheel-rail, rolling stock, railway track  
UDC 519.63

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state task of the Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences" on the topic No. FNEF-2022-0005 "Mathematical Modeling of Dynamic Processes in Deformable and Reacting Media using Multiprocessor Computing Systems", Reg. No. 1021060708369-1-1.2.1.

**For citation:** Anton A. Kozhemyachenko. Calculation of the movement of rolling stock along the railway track by the grid-characteristic method. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):193-198e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.193.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (194)
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (194)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (196)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (197)

## ЛИТЕРАТУРА (197)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи мониторинга и безопасности при совершении железнодорожных перевозок имеют большое значение для развития тяжеловесного и высокоскоростного движений подвижных составов в различных условиях эксплуатации. Большое внимание уделено проблемам моделирования усилия в системе "колесо-рельс", анализу пятен контакта и моделям износа колесных пар и рельсов [1-5], особенностям проектирования пути [6-7], движению по балластному и с ездой по плитам железнодорожному пути [8-10].

Для численного моделирования этого класса задач зачастую применяются конечно-элементные подходы, методы Галеркина [11-15], в том числе с использованием коммерческого

программного обеспечения ANSYS, ABAQUS и др.

В настоящей работе предложено использовать сеточно-характеристический метод, позволяющий рассматривать задачи движения подвижного состава в различных условиях эксплуатации в динамической постановке и исследовать влияние волновых процессов при движении подвижного состава с использованием конечно-разностных схем высокого порядка точности по времени и пространству [16-18].

### 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для численного моделирования задачи движения железнодорожного состава железнодорожное полотно представляется в виде набора слоев изотропной линейно-упругой среды, описываемой в двумерном случае системой уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} + \mathbf{A}_2 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = (v_x, v_y, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy})^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} \\ -\lambda - 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda - 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где в (2)  $\mathbf{q}$  – вектор искомых функций, к числу которых относятся компоненты скорости распространения возмущения  $\mathbf{v}$  и компоненты симметричного тензора напряжений Коши  $\sigma$ , в (3)  $\lambda, \mu$  – параметры Ламе, определяющие упругие свойства материала,  $\rho$  – плотность среды. Матрицы  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$  имеют набор собственных значений  $\{c_p, -c_p, c_s, -c_s, 0\}$ , где  $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$  – скорость распространения продольных волн,  $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$  – скорость распространения поперечных волн. Таким образом, исходная система (1) является гиперболической, а значит матрицы  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$  могут быть представлены в виде

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Omega} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Omega}^{-1},$$

где матрица  $\mathbf{\Omega}$  состоит из столбцов, являющихся правыми собственными векторами исходной матрицы, которые, в свою очередь, отвечают собственным значениям, которые являются элементами диагональной матрицы  $\mathbf{\Lambda}$ . Расщепляя систему (1) по пространственным направлениям и используя переход к инвариантам Римана  $\omega = \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{q}$ , которые переносятся по характеристикам гиперболической системы, получим гиперболическую систему из линейных уравнений переноса с постоянными коэффициентами в инвариантах Римана

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{\Lambda} \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Система в инвариантах Римана (4) на верхнем слое по времени может быть численно проинтегрирована с использованием

конечно-разностных схем, например, при помощи схемы Русанова [19], используемой при расчетах в настоящей работе, третьего порядка по времени и пространству. Для перехода к компонентам  $\mathbf{v}$  и  $\sigma$  на верхнем слое по времени после расчета инвариантов Римана используется обратное преобразование  $\mathbf{q} = \mathbf{\Omega} \omega$ .

Принципиальная модель устройства железнодорожного пути, проложенного по земляному полотну, приведена на Рис. 1, а в условиях мостового сооружения на Рис. 2. Характеристики сред приведены в Таблице 1. Общая длина участка пути в обоих случаях составляла 25 м. На границах сред, являющихся элементами соответствующей модели, ставились условия свободной границы

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (5)$$

где  $\mathbf{n}$  – нормаль к соответствующей границе.

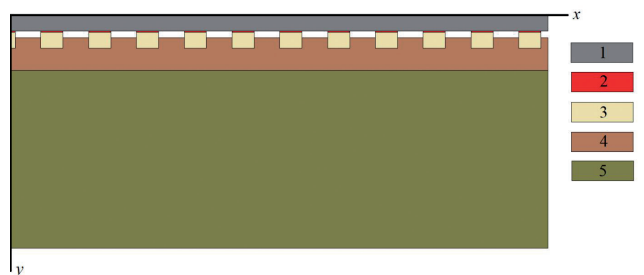


Рис. 1. Железнодорожный путь, проложенный по земляному полотну: 1 – рельс, 2 – демпферы, 3 – шпалы, 4 – балласт, 5 – земляное полотно.

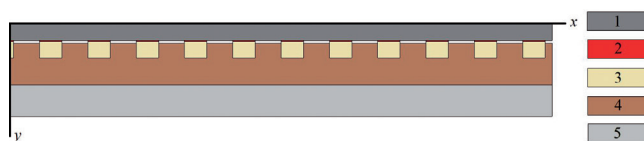


Рис. 2. Железнодорожный путь на мосту: 1 – рельс, 2 – демпферы, 3 – шпалы, 4 – балласт, 5 – несущая конструкция.

Таблица 1  
 Параметры моделируемых сред.

Среда	Скорость Р-волн, м/с	Скорость S-волн, м/с	Плотность, кг/м³
Рельеф	5740	3092	7800
Демпфер	700	120	1200
Шпала	4200	2200	2500
Балласт	500	300	1400
Земляное полотно	2000	1000	2000
Несущая конструкция	4200	2200	2500

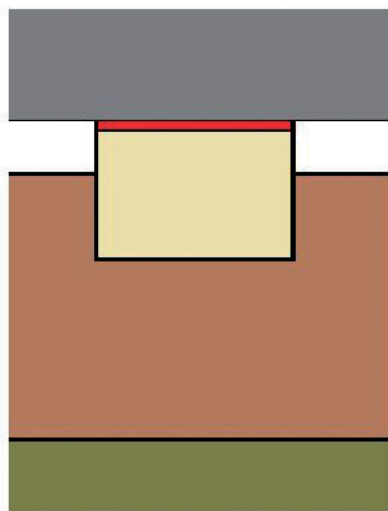


Рис. 3. Положение демпфера (красный) между рельсом и шпалой.

Между контактными средами (среда 1 и среда 2) ставится условие полного сцепления на контактной границе, которое описывается выражениями

$$v_1 = v_2,$$

$$\sigma_1 \cdot n = \sigma_2 \cdot n,$$

здесь  $n$  – нормаль к границе контактирующей среды 1.

На левой и правой границах областей интегрирования на Рис. 1 и Рис. 2 используются условия поглощения. Аналогично, это условие используется и для нижней границы области интегрирования на Рис. 1 для слоя осадочных пород. В случае мостового сооружения на нижней границе несущей конструкции задается условие свободной границы (5). Между рельсом и шпалой в обоих постановках используется демпфер, для наглядности вынесенный отдельно на Рис. 3.

Для моделирования прохождения подвижного состава по железнодорожному пути из Рис. 1 и Рис. 2 использовалось граничное условие усилия в системе "колесо-рельс" из [16] с модификацией, позволяющей учитывать сразу несколько элементов подвижного состава на Рис. 4. Геометрические параметры элемента подвижного состава составляли  $H_{TRAIN} = 7.7$  м,  $L_{TRAIN} = 1.85$  м, масса 90 т. Давление колеса без дефектов на рельс в системе "колесо-рельс" бралось равным 188 МПа.

В расчете области интегрирования на Рис. 1 и Рис. 2 покрывались прямоугольными

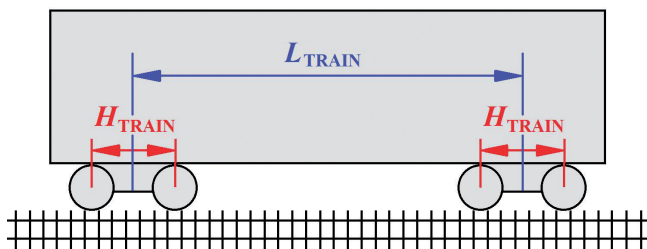


Рис. 4. Элемент подвижного состава.

Таблица 2

Параметры расчетной сетки.

Среда	Шаг вдоль OX, м	Шаг вдоль OY, м
Рельс	0.01	0.005
Демпфер	0.01	0.001
Шпала	0.01	0.005
Балласт	0.01	0.005
Земляное полотно	0.01	0.010
Несущая конструкция	0.01	0.010

расчетными сетками с постоянным шагом для соответствующей среды согласно Таблице 2, шаг интегрирования по времени составлял  $10^{-7}$  с.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис. 5 и Рис. 6 приведены результаты расчетов динамического распределения нагрузки

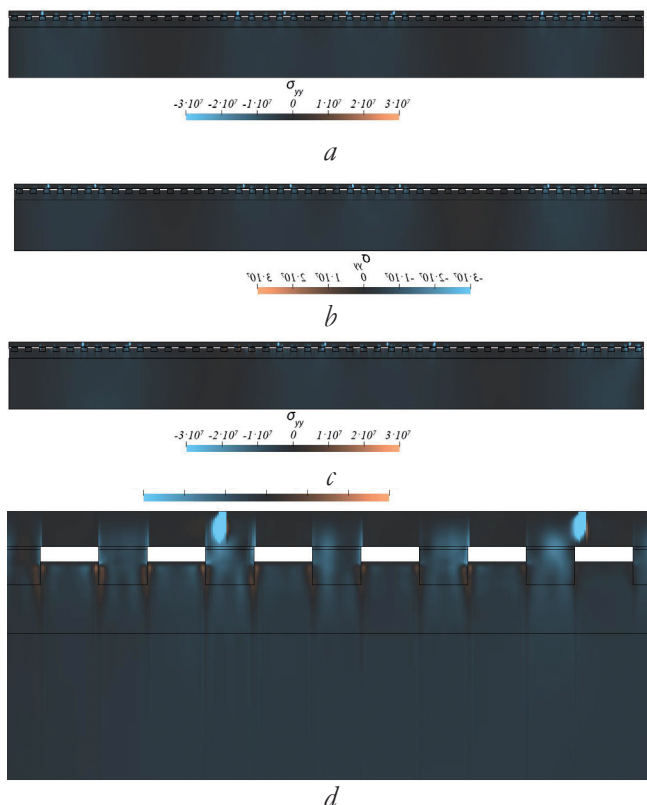


Рис. 5. Движение подвижного состава из двух элементов по земляному полотну: а – начало движения, б – 0.0255 с, с – 0.051 с, d – укрупненная картина слева в момент 0.051 с.





**Рис. 6.** Движение подвижного состава из двух элементов по мосту: *a* – начало движения, *b* – 0.0255 с, *c* – 0.051 с, *d* – укрупненная картина слева в момент 0.051 с.

вертикальной компоненты тензора напряжений Коши в различные моменты времени при движении подвижного состава, состоящего из двух элементов, по железнодорожному пути, проложенному по земляному полотну со скоростью 120 км/ч и на мосту со скоростью 72 км/ч соответственно. Для учета медленного возрастания напряжений вследствие взаимодействия поезда и рельса от нуля до заданного значения в системе "колесо-рельс" произведено 170000 итераций по времени. Общее количество итераций по времени составило 680000, т.е. общее время движения подвижного состава составило 0.051 с.

Полученные результаты показывают важность учета в математической модели ряда актуальных норм проектирования пути, часть из которых не была учтена ранее в работах [16-18]: наличие демпфирующего слоя между рельсами и шпалами, использование железобетонных шпал, в отличие от деревянных. Благодаря используемой модификации граничного условия возможно задание подвижного состава, состоящего из большого числа элементов.

При сравнении волновых картин на Рис. 5 и Рис. 6 видно, что при движении на мосту в конструкции моста в зоне стыка рельс-демпфер-шпала образуется более выраженная картина напряжений, чем при движении по земляному полотну. Это обусловлено тем, что в случае движения по земляному полотну волновой фронт уходит в толщу осадочных пород, тогда как на нижней поверхности моста происходит переотражение приходящего волнового фронта обратно в конструкцию пути.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием сеточно-характеристического метода на структурированных прямоугольных сетках в комбинации с модификацией граничного условия для системы "колесо-рельс" возможно получение распределений напряжений при движении подвижного состава, состоящего из большого числа элементов, по железнодорожному пути в различные моменты времени. Предложенный подход и математические модели позволяют учитывать демпферный слой между рельсами и шпалами, изменять параметры и вид конструкции, используя различные виды контактных и граничных условий, скоростной режим. Полученные алгоритмы и модели могут быть использованы для анализа волновых эффектов при движении подвижного состава и постановки задачи прохождения подвижного состава в условиях перехода от железнодорожного пути, проложенного по земляному полотну, к пути, проложенному в условиях мостового сооружения, с учетом изменения жесткости подрельсового основания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Six K, Mihalj T, Trummer G, Marte C, Krishna VV, Nia SH, Stichel S. Assessment of running gear performance in relation to rolling contact fatigue of wheels and rails based on stochastic simulations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 2019, 234(4):0954409719879600. DOI: 10.1177/0954409719879600.
2. Goryacheva I, Torskaya EV. Modeling the Accumulation of Contact Fatigue Damage in Materials with Residual Stresses under Rolling

- Friction. *Journal of Friction and Wear*, 2019, 40(1):33-38.
3. Torskaya EV, Goryacheva IG, Muravyeva TI, Shcherbakova OO, Tsukanov IY, Meshcheryakova AR, Shkaley IV, Zagranichnik KL, Zakharov SM, Shur EA. Rolling Contact Fatigue Damage in Welded Rail Steel Joints. *Physical Mesomechanics*, 2023, 26(1):7-18; doi: 10.1134/S1029959923010022.
  4. Loktev AA, Korolev VV, Shishkina IV, Basovsky DA. Modeling the Dynamic Behavior of the Upper Structure of the Railway Track. *Procedia Engineering*, 2017, 189:133-137. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.022.
  5. Huang YB, Shi LB, Zhao XJ, Cai ZB, Liu QY, Wang WJ. On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under dry condition. *Wear*, 2018, 400:62-73. DOI: 10.1016/j.wear.2017.12.020.
  6. Zakeri JA, Rezvani FH. Failures of railway concrete sleepers during service life. *International Journal of Construction Engineering and Management*, 2012, 1(1):1-5.
  7. Ngamkhanong C, Kaewunruen S, Costa BJA. State-of-the-art review of railway track resilience monitoring. *Infrastructures*, 2018, 3(1):3.
  8. Liu K, Lombaert G, De Roeck G. Dynamic analysis of multi-span viaducts under the passage of the train using a substructure approach. *Bridge Engineering*, 2014, 19(1):83-90.
  9. Poliakov V, Dang TN. Wheel-rail impact interaction on the high-speed railroad bridges. *Russian Journal of Transport Engineering*, 2019, 6(1):15SATS119.
  10. Charoenwong C, Connolly DP, Colaco A, Alves Costa P, Woodward PK, Romero A, Galvin P. Railway slab vs ballasted track: A comparison of track geometry degradation. *Construction and Building Materials*, 378:131121.
  11. Adak D, Pramod A, Ooi E, Natarajan S. A combined virtual element method and the scaled boundary finite element method for linear elastic fracture mechanics. *Eng. Anal. Boundary Elem*, 2020, 113:9-16.
  12. Tang Z, Liu F, Guo S, Chang J, Zhang J. Evaluation coupled finite element/meshfree method for a robust full-scale crashworthiness simulation of railway vehicles. *Adv. Mech. Eng*, 2016, 8:1687814016642954.
  13. Nejad R, Liu Z, Ma W, Berto F. Reliability analysis of fatigue crack growth for rail steel under variable amplitude service loading conditions and wear. *Int. J. Fatigue*, 2021, 152:106450.
  14. Krishnamoorthy RR, Saleheen Z, Effendy A, Alisibramulisi A, Awaludin A. The Effect of Rubber Pads on The Stress Distribution for Concrete Railway Sleepers. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, 431(11):112007.
  15. Shahraki M, Warnakulasooriya C, Witt KJ. Numerical Study of Transition Zone Between Ballasted and Ballastless Railway Track. *Transportation Geotechnics*, 2015, 3:58-67.
  16. Kozhemyachenko AA, Petrov IB, Favorskaya AV, Khokhlov NI. Boundary conditions for modeling the impact of wheels on railway track. *Comput. Math. Math. Phys.*, 2020, 60(9):1539-1554.
  17. Kozhemyachenko AA, Petrov IB, Favorskaya AV. Calculation of the stress state of a railway track with unsupported sleepers using the grid-characteristic method. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2021, 62:344-350.
  18. Koyhemzachenko AA, Kabanova AS, Petrov IB, Favorskaya AV. Modeling Movement of Train Along Bridge by Grid-Characteristic Method. Smart Modelling For Engineering Systems. *Smart innovation, Systems and Technologies*, 2021, 214:165-174.
  19. Favorskaya A, Khokhlov N. Accounting for curved boundaries in rocks by using curvilinear and Chimera grids. *Procedia Computer Science*, 2021, 192:3787-3794.

**Кожемяченко Антон Андреевич**

аспирант

Московский физико-технический институт  
 Долгопрудный 141700, Московская обл., Россия  
 E-mail: anton-kozhemyachenko@yandex.ru.

## ПАМЯТИ

## РОСТИСЛАВА ВЛАДИМИРОВИЧА БЕЛЯЕВА

PACS: 01.60.+q

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.199



19 апреля 2023 года на 89-ом году жизни скончался Ростислав Владимирович Беляев – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории физических основ нанокompозитных материалов для информационных технологий Отдела физических основ нанoeлектроники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Академии наук Российской Федерации, член-корреспондент Российской академии естественных наук, известный специалист в области генерации СВЧ шумовых колебаний и обработки широкополосных сигналов на основе динамического хаоса.

Ростислав Владимирович родился в 1934 г. в городе Астрахани. Его отец, В.И. Беляев, врач-хирург, окончил Астраханский медицинский институт. Умер в 1939 г. в возрасте 30 лет от неизлечимой болезни. Дед по отцу – И.А. Беляев родился в 1885 г. в Калужской губернии, окончил в 1914 г. медицинский факультет Императорского Николаевского университета в г. Саратове. Был призван на военную службу, награжден орденами Св. Станислава 2 и 3-й степени, орденом Св. Анны 3-й степени. С 1915 года работал на кафедре глазных болезней Императорского Николаевского университета, с 1923 по 1933 гг. заведовал глазной клиникой Астраханского медицинского института в звании профессора, с 1933 по 1944 гг. заведовал кафедрой глазных болезней Саратовского медицинского института. Мама окончила Астраханский медицинский институт и всю жизнь работала детским врачом. Ее родители были военные, а по мужу матери – предприниматели.

После окончания в 1952 году средней школы Р.В. Беляев поступает в Московский физико-технический институт на 1-ю специальность – электроника (факультетов тогда в МФТИ еще не

было). В процессе учебы в МФТИ проходит базовую практику и обучение на ведущем предприятии электронной промышленности СССР НИИ "Исток", г. Фрязино Московской области. Дипломную работу по окончании обучения, посвященную исследованию автоэмиссионных свойств редкоземельных элементов, под руководством к.ф.-м.н. Б.С. Кульварской выполняет в недавно созданном в Москве по инициативе академика А.И. Берга Институте радиотехники и электроники АН СССР (1953 г., в здании физфака МГУ, переехавшего на Ленинские горы).

После защиты диплома Р.В. Беляев в 1958 году распределен в ИРЭ АН СССР на должность м.н.с., где в отделении электроники, руководимом член-корреспондентом АН СССР Д.В.Зерновым, занимался разработкой и исследованием электронно-лучевых систем с плоским лучом для автоматического кодирования сигналов. В 1971 г. при реорганизации структуры отдела Р.В. Беляев переводится в лабораторию, руководимую д.ф.-м.н. В.Я. Кисловым, и, соответственно, изменяется направление выполняемых им работ.

Основная тематика дальнейшей деятельности Р.В. Беляева связана с развивающимся направлением генерации хаотических колебаний с уровнем, превышающим уровень собственных шумов систем, то есть за счет свойств нелинейности и эффектов запаздывания, реализуемых, в частности, в системах с обратной запаздывающей связью: исследования и разработки в области генерации СВЧ широкополосных шумовых колебаний в плазме; исследования и создание электронно-волновых приборов СВЧ-диапазона; исследования и создание генераторов шумовых сигналов СВЧ-диапазона на основе твердотельных полупроводниковых приборов.

Далее, в связи с переходом от аналоговых систем к цифровым, Р.В.Беляевым проводились исследования алгоритмов формирования псевдослучайных числовых (целочисленных) последовательностей и их свойств: разработка цифровых широкополосных информационных технологий на основе динамического хаоса для обработки, передачи, хранения и защиты информации; разработка и исследование применения фрактальных методов анализа сложных широкополосных сигналов.

Диссертационная работа Р.В. Беляева на звание к.ф.-м.н., законченная в 1986 году, посвящена исследованию возбуждения шумовых колебаний в генераторах на лавинно-пролетных диодах (ГЛПА). Известно, что в



таких генераторах возбуждаются колебания, спектр которых наряду с гармоническими составляющими содержит непрерывную компоненту с уровнем, превышающим результат воздействия флуктуаций лавинного тока. В ряде случаев повышение рабочего тока ГЛПД ведет к возбуждению шумовых колебаний без выделения гармонических составляющих. Исследования на простых моделях автоколебательных систем типа генератора Ван-дер-Поля показали, что при определенных условиях даже в таких системах могут реализовываться режимы со сложным характером колебаний. Для выявления природы возбуждения аномальных по уровню шумов в ГЛПД экспериментально исследовались такие генераторы на простых системах, позволяющих управляемо возбуждать одно-, двух- и трехмодовые колебания. Показано, что в этих системах при изменении тока ГЛПД реализуются режимы со спектрами, изменяющимися в соответствии со сценариями последовательного усложнения генерируемых колебаний, характерными для широкого класса динамических систем простых исследованных моделей. Эти результаты свидетельствуют о динамической природе возбуждения аномальных шумовых колебаний в таких генераторах, хотя флуктуации лавинного тока в таких генераторах несомненно влияют на уровень их возникновения, но они не являются непосредственной причиной хаоса, она – в сложной динамике системы диод-колебательных цепей. Эти результаты нашли практическое применение при создании практических систем, генерирующих широкополосные шумовые сигналы на основе ГЛПД с уровнем мощности, сопоставимым с уровнем генерации упорядоченных колебаний.

Р.В. Беляевым совместно с сотрудниками Института разработаны, реализованы и исследованы в виде цифровых схем алгоритмы формирования широкополосных шумовых сигналов, которые нашли практическое применение в реальных устройствах.

Вместе с другими сотрудниками Института он многократно принимал участие в полевых работах и испытаниях в различных районах страны от Камчатки до Астрахани, от Воронежа до Севастополя.

С 1958 года и по 2023 г. Ростислав Владимирович Беляев – сотрудник ИРЭ РАН, с 1971 по 1986 гг. – младший научный сотрудник, с 1989 г. по 2023 г. – старший научный сотрудник, с 2007 по 2010 гг. и.о. зав лабораторией.

Результаты научной работы Р.В. Беляева опубликованы в 75 статьях в различных журналах и доложены на 52 отечественных и международных конференциях. Имеет 4 авторских свидетельства на изобретения.

Р.В. Беляев – участник ряда международных и республиканских конференций, школ по системам с хаотическими колебаниями. Являлся ответственным исполнителем работ по Постановлениям Правительства, а так же по многочисленным грантам МНТЦ и РФФИ. Ростислав Владимирович – член Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова с момента его создания в 1991 году, член-корреспондент Российской академии естественных наук (2001) по Отделению проблем радиотехники, нанотехники и информационных технологий.

С 2009 года Р.В. Беляев – ответственный секретарь научного журнала «РЭНСИТ: Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии».

В 1997 году ему было присвоено почетное звание Ветеран труда; он награжден медалью "В ознаменование 850-летия Москвы", нагрудным знаком "Почетный радист" Министерства радиопромышленности Российской Федерации.

Ростислав Владимирович был неутомимым путешественником и многоопытным водным туристом, исколесившим и исходившим страну от Крайнего Севера – Кольский полуостров, Приполярный Урал, Путоран, Камчатка, притоки Печоры, Оби, Енисея (Нижняя и Подкаменная Тунгуски), Лены, до Юга – Байкал, Иссык-Куль, Тува – район истоков Енисея вблизи границ с Монголией. При этом он активно пропагандировал такой образ жизни среди сотрудников, втягивая их в свои головкружительные проекты.

Жизнь Ростислава Владимировича – живая история ИРЭ РАН, он всегда был там, где нужна тяжелейшая по кропотливости работа, создающая почву, на которой выросли все значимые результаты коллектива его лаборатории. Его надежность, природная интеллигентность, вежливость, предупредительность, отзывчивость, высокая научная эрудиция, удивительная работоспособность, преданность делу, принципиальность и ответственность – бесценный дар коллективу его сотрудников.

Светлая и вечная память о Ростиславе Владимировиче Беляеве сохранится в наших сердцах.

**Родные, друзья, коллеги  
и редакция журнала РЭНСИТ**



## ПАМЯТИ

## НИКОЛАЯ НИКОЛАЕВИЧА ЗАЛОГИНА

PACS: 01.60.+q

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.201



01 июня 2023 года на 88-ом году жизни скончался Николай Николаевич Залогин – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории физических основ нано композитных материалов для информационных технологий Отдела физических основ нано электроники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Академии наук Российской Федерации, известный специалист в области генерации СВЧ шумовых колебаний, их применения в РЭБ, радиолокации и обработке широкополосных сигналов на основе динамического хаоса.

Потомок (6 колена) старинного купеческого рода Залогиных из подмосковного Богородска (ныне – Ногинск), Николай Николаевич родился 6 августа 1935 года в г. Москве. Отец – Залогин Николай Георгиевич (1902-1978), инженер, специалист по очистке дымовых газов тепловых электростанций в Москве. За создание системы маскировки дымов в инфракрасном диапазоне во время войны награждён Орденом Красной Звезды. Мать – Бауман Людмила Николаевна, научный работник, заведующая лабораторией.

После окончания в 1953 году средней школы Н.Н. Залогин со второй попытки, в 1954 г.

поступает в Московский физико-технический институт. С 1957 г., после 3-го курса, проходил базовую, а затем преддипломную практику в Институте радиотехники и электроники Академии Наук СССР.

В 1960 г. Н.Н. Залогин был принят на работу в ИРЭ на должность м.н.с. в Отдел СВЧ электроники академика АН СССР Николая Дмитриевича Девяткова, в лабораторию электронных генераторов д.т.н. Чернова З.С. В 1961 г. при реорганизации структуры отдела Н.Н. Залогин переводится в лабораторию к.т.н. В.Я. Кислова, и, соответственно, изменяется направление выполняемых им работ. Первоначально лаборатория В.Я. Кислова занималась исследованием возможности создания плазменных приборов О-типа в сантиметровом диапазоне длин волн. Успешное развитие этого направления, как предполагалось, позволяло избавиться от мелкогабаритных замедляющих систем в миллиметровом диапазоне длин волн. Работая в этом направлении как экспериментатор, Н.Н. Залогин впервые обнаружил (1962 г.) генерацию СВЧ шума в системе плазма-электронный поток (в плазменной лампе обратной волны). По заявке на изобретение генератора шума (авторы Н.Н. Залогин и В.Я. Кислов) было получено АС № 28547 с приоритетом от 15 апреля 1963 г.

С 1963 г. Н.Н. Залогин – заочный аспирант в ИРЭ АН СССР. Диссертационная работа «Плазменный генератор шума» на звание к.т.н., законченная в 1967 году успешной защитой, была посвящена исследованию генерации шумовых колебаний в системе плазма-электронный поток в результате его продольного взаимодействия с обратной электромагнитной волной в 10 мм диапазоне длин волн, распространяющейся по плазменному волноводу. Научным руководителем аспиранта Залогина Н.Н. был заведующий отделом академик АН СССР Н.Д. Девятков.

С 1970 г. Николай Николаевич – старший научный сотрудник. В 1970 г. был вместе с другими сотрудниками лаборатории В.Я. Кислова переведён во Фрязинский филиал ИРЭ

АН СССР в лаб. 166. В 1975 г. был переведён обратно в Московскую часть ИРЭ, но продолжал работать по "шумотронной" тематике с лаб. 166. Эти работы были отмечены в 1980 г. Государственной Премией СССР по науке и технике (по закрытой тематике) коллективу авторов ИРЭ АН СССР – Кислову В.Я., Залогину Н.Н. и Мясину Е.А.

После обнаружения эффекта генерации шумовых колебаний в системах на основе ламп бегущей волны с задержанной обратной связью основная тематика дальнейшей деятельности Н.Н. Залогина была связана с этим развивающимся направлением исследований – генерацией хаотических колебаний с уровнем, превышающим уровень собственных шумов систем, то есть за счет свойств нелинейности и эффектов запаздывания, реализуемых, в частности, в системах с обратной запаздывающей связью: исследования и разработки в области генерации СВЧ широкополосных шумовых колебаний; исследования и создание электронно-волновых приборов СВЧ-диапазона; исследования и создание генераторов шумовых сигналов СВЧ-диапазона на основе твердотельных полупроводниковых приборов.

Вместе с другими сотрудниками Института Н.Н. Залогин многократно принимал участие в полевых работах и испытаниях разработанных систем в различных районах страны от Камчатки до Астрахани, от Воронежа до Севастополя.

С 1999 г. Н.Н. Залогин – ведущий научный сотрудник ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Результаты научной работы Н.Н. Залогина опубликованы в более чем 120 статьях в различных журналах и доложены на десятках отечественных и международных конференциях. Когда у коллектива соавторов набирался материал для публикации, то на вопрос «кто будет писать?» – следовал ответ: «Н.Н. Залогин, конечно». Имеет 4 авторских свидетельства на изобретения, лауреат двух премий Совета Министров СССР (1984 и 1989 гг.). Автор монографии "Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах" (М., Радиотехника, 2006), написанной удивительным для научной монографии языком, отражающим редкий

литературный дар автора с его острым, образным, всегда ироничным тоном.

Н.Н. Залогин – участник ряда международных и республиканских конференций, школ по системам с хаотическими колебаниями. Являлся ответственным исполнителем работ по Постановлениям Правительства, а также по многочисленным грантам МНТЦ и РФФИ. Николай Николаевич – член Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова с момента его создания в 1991 году. В 1997 году ему было присвоено почетное звание Ветеран труда; он награжден медалью "В ознаменование 850-летия Москвы", нагрудным знаком "Почетный радист" Министерства радиопромышленности Российской Федерации.

Жена Залогина (урожденная Шидловская) Елена Александровна (1937-1999), химик, сотрудник Научно-исследовательского института химических реактивов и особо чистых химических веществ. Сыновья (7 колена рода Залогиных) Александр (1961) – к.ф.-м.н. (дети – Алексей, Татьяна, Мария, Андрей), и Владимир (1964) – специалист в области компьютерных сетей (сын Иван, 1998).

С 1993 года жил в деревне Дунино Одинцовского района Подмосковья. Вся деревня ходила к нему за помощью и советом по любым вопросам от технических до семейных. В Дунином музее М.М. Пришвина Николай Николаевич всегда был желанным участником всех ключевых мероприятий жизни музея, почти внештатным сотрудником. Кроме того, будучи внуком последнего владельца подмосковной усадьбы "Фряново", ставшей в настоящее время музеем, Николай Николаевич участвовал в оснащении музея экспонатами.

Жизнь Николая Николаевича – живая история ИРЭ РАН, его природная интеллигентность, отменная научная эрудиция, удивительная работоспособность, отзывчивость, принципиальность и ответственность – бесценный дар коллективу его сотрудников.

Светлая память о Вас, Николай Николаевич, долго будет греть сердца всех, Вас знавших.

**Родные, друзья, коллеги  
и редакция журнала РЭНСИТ**