

ISSN 1817-3020 (Print)
ISSN 2542-193X (Online)

ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия

Серия: Физика

2025

Том 25

Выпуск 1



IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY
PHYSICS



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

ИЗВЕСТИЯ

САРАТОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
Новая серия

Серия Физика, выпуск 1

Продолжение «Известий Императорского Николаевского Университета» 1910–1918, «Ученых записок СГУ» 1923–1962,
«Известий Саратовского университета. Новая серия» 2001–2004



Научный журнал
2025 Том 25

ISSN 1817-3020 (Print)

ISSN 2542-193X (Online)

Издается с 2005 года

СОДЕРЖАНИЕ

Научный отдел

Радиофизика, электроника, акустика

Гаранин Ф. Е., Хутиева А. Б., Ломова М. В., Садовников А. В.

Управление распространением спиновых волн в микроволновом с двумерным массивом магнитных микрочастиц различной геометрии

4

Мазин А. С., Болдырев Н. А., Падалинский М. М., Фитаев И. Ш.,

Старосек А. В. Частотные зависимости и диаграммы рассеяния комбинированных металлодиэлектрических поверхностей в диапазоне 16–25 ГГц

12

Оптика и спектроскопия. Лазерная физика

Бабков Л. М. ИК спектры и структурно-динамические ангармонические модели циклогексанола

24

Физика конденсированного состояния вещества

Державин И. М., Баделин А. Г., Карпасюк В. К., Эстемирова С. Х.

Структура, магнитные и электрические свойства La-Sr манганита, легированного церием и цинком

37

Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Амаханов Г. М., Никулин Ю. В.

Влияние кристаллографической анизотропии ненасыщенной пленки железитригидрата на спиновую инжекцию в пленку платины по механизму обратного спинового эффекта Холла

44

Биофизика и медицинская физика

Скрипаль Ан. В., Верхов Д. Г., Аль-Бадри Фракад, Машков К. В., Усанов А. Д., Сагайдачный А. А., Клочков В. А. Проявление вено-артериального рефлекс, вызванного изменением положения руки, при измерениях микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии

53

Шабунин А. В. Стохастическая SIRS+V модель распространения инфекционных заболеваний

67

Майорова О. А., Гулякова О. И., Савельева М. С., Куликов О. А.,

Иноземцева О. А. Микрогели, содержащие сывороточный белок, как новый способ терапии заболеваний мочевого пузыря и почек

76

Кравчук Д. А. Экспериментальные измерения концентрации глюкозы в крови прототипом оптоакустического цитометра, оценка погрешности измерений

86

Нанотехнологии, наноматериалы и метаматериалы

Стецюра С. В., Харитонов П. Г., Козловский А. В. Перспективы создания и использования гетерофазного материала CdS-FeS, полученного с применением метода Ленгмюра-Блоджетт

93

Кочуров Л. А., Зимняков Д. А. Компьютерное моделирование флуктуаций проводимости в динамической перколяционной модели на основе резистивных сеток

106

Университетская летопись

Из истории физики

Шашкина М. Н., Аникин В. М. Саратовские годы Олега Антонова: конструктор планеров и студент университета

113

Приложения

Personalia

К 70-летию со дня рождения Сергея Аполлоновича Никитова

129

Журнал «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Физика»» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Запись о регистрации СМИ ПИ № ФС77-76653 от 26 августа 2019 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (категория К1, специальности: 1.3.3, 1.3.4, 1.3.5, 1.3.6, 1.3.11, 1.3.19, 1.5.2, 2.2.2).

Журнал индексируется Scopus, RSCI, DOAJ

Подписной индекс издания 36015.

Подписку на печатные издания можно оформить в Интернет-каталоге ГК «Урал-Пресс» (ural-press.ru).

Журнал выходит 4 раза в год.

Цена свободная.

Электронная версия находится в открытом доступе (fizika.sgu.ru)

Директор издательства

Бучко Ирина Юрьевна

Редактор

Трубникова Татьяна Александровна, Дударева Светлана Сергеевна

Редактор-стилист

Агафонов Андрей Петрович

Верстка

Пермяков Алексей Сергеевич

Технический редактор

Каргин Игорь Анатольевич

Корректор

Агафонов Андрей Петрович

В оформлении издания использованы работы художника Соколова Дмитрия Валерьевича (13.11.1940–20.11.2023)

Адрес учредителя, издателя и издательства (редакции):

410012, Саратов, ул. Астраханская, 83
Тел.: +7(845-2) 51-29-94, 51-45-49, 52-26-89

E-mail: publ@sgu.ru, izdat@sgu.ru

Подписано в печать 21.03.2025.

Подписано в свет 31.03.2025.

Выход в свет 31.03.2024.

Формат 60 × 84 1/8.

Усл. печ. л. 15.17 (16.25).

Тираж 100 экз. Заказ 10-Т.

Отпечатано в типографии Саратовского университета.

Адрес типографии:

410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский университет, 2025



ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал публикует на русском и английском языках научные статьи по физике, содержащие новые результаты исследований, статьи учебно-методического характера, содержащие инновационную компоненту, статьи по методологии разделов физической науки, статьи, отражающие хронику научных мероприятий и важных событий в жизни физического сообщества.

Материалы, ранее опубликованные или представленные для публикации в другие журналы, к рассмотрению не принимаются. Рекомендуемый объем статьи – до 25 страниц текста, включая рисунки, таблицы и список литературы. На русском языке статья содержит: УДК, заглавие, инициалы и фамилии авторов, название их места работы, электронный адрес авторов, аннотацию (200–250 слов), ключевые слова, текст, благодарности и ссылки на гранты, список литературы.

На английском языке необходимо продублировать: заглавие, инициалы (имя – полностью) и фамилии авторов, структурированную аннотацию (250–600 слов), ключевые слова, список литературы (references). Для каждого автора указать ORCID.

Текст должен быть набран и напечатан через 1,5 интервала на бумаге формата А4 с полями 2,5 см, шрифт Times New Roman, размер шрифта текста – 14.

Текст статьи должен быть подписан всеми авторами.

Для публикации статьи необходимо загрузить на сайт журнала: текст статьи, оформленный согласно правилам журнала; направление от организации (отсканированное в формате pdf); лицензионный договор (отсканированный в формате pdf); экспертное заключение; согласие на обработку персональных данных.

Список литературы следует оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка». В списке литературы нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. В библиографическом списке должны быть указаны только процитированные в статье работы.

Все рукописи, поступившие в редколлегия и соответствующие профилю журнала, проходят рецензирование, а затем редколлегия принимает решение о возможности их опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Более подробно с правилами для авторов и порядком рецензирования можно ознакомиться на сайте журнала: <http://fizika.sgu.ru>

Адрес редколлегии серии: 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, СГУ имени Н. Г. Чернышевского, Институт физики

Тел./факс: +7 (8452) 52-27-05

E-mail: fizik@sgu.ru

Website: <https://fizika.sgu.ru>

CONTENTS

Scientific Part

Radiophysics, Electronics, Acoustics

- Garanin F. E., Khutieva A. B., Lomova M. V., Sadovnikov A. V.**
Control of spin wave propagation in a microwaveguide with a two-dimensional array of magnetic cylinders of variable configuration 4

- Mazinov A. S., Padalinsky M. M., Boldyrev N. A., Fitaev I. Sh., Starosek A. V.**
Frequency dependencies and scattering diagrams of combined metal-dielectric surfaces in frequency range of 16–25 GHz 12

Optics and Spectroscopy. Laser Physics

- Babkov L. M.**
IR spectra and structural-dynamic anharmonic models of cyclohexanol 24

Physics of Condensed Matter

- Derzhavin I. M., Badelin A. G., Karpasyuk V. K., Estemirova S. Kh.**
Structure, magnetic and electrical properties of La-Sr manganite doped with cerium and zinc 37

- Vysotskii S. L., Seleznev M. E., Amakhanov G. M., Nikulin Yu. V.**
Influence of crystallographic anisotropy of unsaturated yttrium iron garnet film on spin injection in platinum film by the mechanism of inverse spin Hall effect 44

Biophysics and Medical Physics

- Skripal An. V., Verkhov D. G., Al-Badri Farqad, Mashkov K. V., Usanov A. D., Sagaidachnyi A. A., Klochkov V. A.**
The appearance of the venuloarteriolar reflex during measurements microcirculation of blood by laser Doppler flowmetry caused by a change in the position of the hand 53

- Shabunin A. V.**
Stochastic SIRS+V model of infections spread 67

- Mayorova O. A., Gusliakova O. I., Saveleva M. S., Kulikov O. A., Inozemtseva O. A.**
Microgels containing whey protein as a new way of treating bladder and renal diseases 76

- Kravchuk D. A.**
Experimental measurements of glucose concentration in blood with a prototype of optoacoustic cytometer, assessment of measurement error 86

Nanotechnologies, Nanomaterials and Metamaterials

- Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Kozlowski A. V.**
Perspectives for the creation and application of heterophase material CdS-FeS obtained by the Langmuir–Blodgett method 93

- Kochkurov L. A., Zimnyakov D. A.**
Computer simulation of conductivity fluctuations in a dynamic percolation model based on resistive networks 106

University Chronicle

From the History of Physics

- Shashkina M. N., Anikin V. M.**
Oleg Antonov's Saratov years: Glider designer and university student 113

Appendices

Personalia

- On the 70th anniversary of the birth of Sergei A. Nikitov 129



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ.
СЕРИЯ: ФИЗИКА»**

Главный редактор

Короновский Алексей Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Заместители главного редактора

Тучин Валерий Викторович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)

Никитов Сергей Аполлонович, доктор физ.-мат. наук, академик РАН (Москва, Россия)

Ответственный секретарь

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Члены редакционной коллегии:

Аникин Валерий Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Бабков Лев Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Вадивасова Татьяна Евгеньевна, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Вениг Сергей Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Виницкий Сергей Ильич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Дубна, Россия)

Горохов Александр Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Самара, Россия)

Давидович Михаил Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Дербов Владимир Леонардович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Дюбуа Арно, Ph.D., профессор Университета Париж-Сакле (Сент-Обен, Франция)

Жу Дан, Ph.D., профессор Хуачжунского университета науки и технологий (Ухань, Китай)

Захарова Анна Сергеевна, Dr. Habil, профессор Берлинского технического университета (Берлин, Германия)

Ларин Кирилл Владимирович, Ph.D., профессор Хьюстонского университета (Хьюстон, США)

Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Модельский Иосиф, Ph.D., профессор Варшавского Технологического университета (Варшава, Польша)

Пирогов Юрий Андреевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

Сербино Роберто, Ph.D., профессор Миланского университета (Милан, Италия)

Скрипаль Александр Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Сухоруков Глеб Борисович, Ph.D., профессор Университета Королевы Марии (Лондон, Великобритания)

Филимонов Юрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Хлебцов Николай Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Чигринов Владимир Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор Гонг Конгского университета науки и технологии (Гонг Конг, Китай)

Шараевский Юрий Павлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
“IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. PHYSICS”**

Editor-in-Chief – Aleksey A. Koronovskii (Saratov, Russia)

Deputy Editors-in-Chief – Valery V. Tuchin (Saratov, Russia))

Sergey A. Nikitov (Moscow, Russia)

Executive Secretary – Anatoly V. Skripal (Saratov, Russia)

Members of the Editorial Board:

Valery M. Anikin (Saratov, Russia)

Lev M. Babkov (Saratov, Russia)

Roberto Cerbino (Milan, Italy)

Vladimir G. Chigrinov (Hong Kong, China)

Michael V. Davidovich (Saratov, Russia)

Vladimir L. Derbov (Saratov, Russia)

Arnaud Dubois (Saint-Aubin, France)

Yuri A. Filimonov (Saratov, Russia)

Alexander V. Gorokhov (Samara, Russia)

Nikolai G. Khlebtsov (Saratov, Russia)

Kirill V. Larin (Houston, USA)

Leonid A. Melnikov (Saratov, Russia)

Joseph Modelski (Warsaw, Poland)

Yuri A. Pirogov (Moscow, Russia)

Yuri P. Sharaevsky (Saratov, Russia)

Alexander V. Skripal (Saratov, Russia)

Gleb B. Sukhorukov (London, UK)

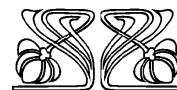
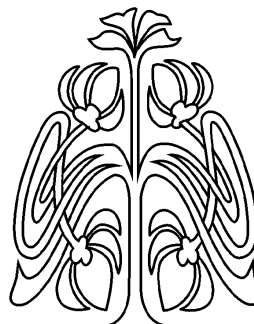
Tatyana E. Vadivasova (Saratov, Russia)

Sergey I. Vinitzky (Dubna, Russia)

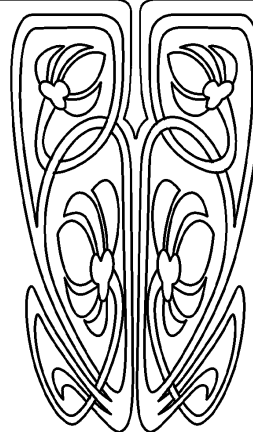
Sergey B. Venig (Saratov, Russia)

Anna S. Zakharova (Berlin, Germany)

Dan Zhu (Wuhan, China)



**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ**





РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 4–11
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 4–11
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-4-11>, EDN: BRQHYM

Научная статья
УДК 537.876.4

Управление распространением спиновых волн в микроволноводе с двумерным массивом магнитных микрочастиц различной геометрии

Ф. Е. Гаранин, А. Б. Хутиева, М. В. Ломова[✉], А. В. Садовников

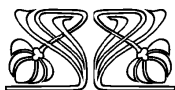
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Гаранин Федор Евгеньевич, лаборант лаборатории «Магнитные метаматериалы», garaninfedor@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4999-2958>

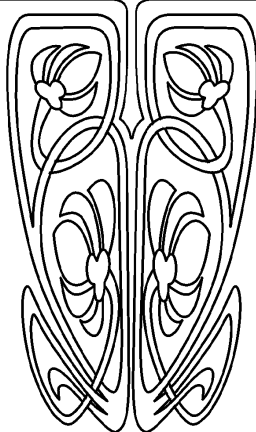
Хутиева Анна Борисовна, младший научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы», abkhutieva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4234-420X>, Author ID: 1100589

Ломова Мария Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, lomovamv85@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7464-1754>, Author ID: 612307

Садовников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем, sadovnikovav@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8847-2621>, Author ID: 601222



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Аннотация. Рассматриваются возможности применения спиновых волн в магненике для создания элементной базы устройств обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазонах. В качестве основного материала используются пленки железо-иттриевого граната, обладающие низким затуханием спиновых волн даже при нанометровых толщинах. Перспективным подходом к управлению СВ является использование двумерных массивов магнитных наноструктур, таких как цилиндры и полуцилиндры из магнетита. Проведено численное микромагнитное моделирование микроволновода с массивом цилиндров и полуцилиндров из магнетита на основе решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта. Основное внимание уделено варьированию геометрических параметров и направления внешнего магнитного поля для изменения характеристик спиновых волн. Результаты моделирования открывают новые возможности для разработки магнетронных устройств с высокой энергоэффективностью и компактными размерами.

Ключевые слова: магненика, спиновые волны, железо-иттриевый гранат, микромагнитное моделирование, магнетит, двумерные массивы, магнитные наноструктуры, численное моделирование, уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-13-00373).

Для цитирования: Гаранин Ф. Е., Хутиева А. Б., Ломова М. В., Садовников А. В. Управление распространением спиновых волн в микроволноводе с двумерным массивом магнитных микрочастиц различной геометрии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 4–11. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-4-11>, EDN: BRQHYM

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



Article

Control of spin wave propagation in a microwaveguide with a two-dimensional array of magnetic cylinders of variable configuration

F. E. Garanin, A. B. Khutueva, M. V. Lomova[✉], A. V. Sadovnikov

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Fedor E. Garanin, garaninfedor@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4999-2958>Anna B. Khutueva, abkhutueva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4234-420X>, Author ID: 1100589Maria V. Lomova, lomovamv85@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7464-1754>, Author ID: 612307Alexander V. Sadovnikov, sadovnikovav@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8847-2621>, Author ID: 601222

Abstract. Background and Objectives: The development of magnonics, focusing on the transfer of magnetic moment or electron spin instead of charge, has opened new opportunities for the application of spin waves (SW) in the design of devices for data processing, transmission, and storage in the microwave and terahertz ranges. Yttrium iron garnet (YIG) films are used as the magnetic material for forming spin-waveguiding structures due to their exceptionally low SW damping, even at nanometer thicknesses. One promising approach to controlling SW is the use of two-dimensional arrays of magnetic nanostructures, such as cylinders and half-cylinders made of magnetite. **Materials and Methods:** This study involves numerical micromagnetic modeling of a microwave waveguide with an array of magnetite cylinders and half-cylinders on its surface. The modeling focuses on varying the geometric parameters of the nanostructures and the direction of the external magnetic field to investigate their influence on SW propagation characteristics. Magnetite was chosen due to its unique magnetic properties and compatibility with modern micro- and nanofabrication technologies. The micromagnetic modeling was based on the numerical solution of the Landau–Lifshitz–Gilbert equation. **Results:** The results of the modeling provide insights into the ability to predict and control SW behavior depending on the geometry of the magnetic elements and the orientation of the external magnetic field. This opens new perspectives for the development of highly efficient magnonic devices. Identifying optimal configurations for the cylinders and half-cylinders could lead to the creation of more compact and energy-efficient components for magnonic logic circuits and other applications in the field of magnonics. **Conclusion:** The study has presented a significant step towards the development of new magnonic devices operating on the principles of spin electronics. The findings offer potential for further exploration and optimization of spin wave dynamics in nanostructured waveguides, contributing to the advancement of magnonic technology.

Keywords: magnonics, spin waves, yttrium iron garnet, micromagnetic modeling, magnetite, two-dimensional arrays, magnetic nanostructures, numerical modeling, Landau–Lifshitz–Gilbert equation

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-13-00373).

For citation: Garanin F. E., Khutueva A. B., Lomova M. V., Sadovnikov A. V. Control of spin wave propagation in a microwaveguide with a two-dimensional array of magnetic cylinders of variable configuration. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 4–11 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-4-11>, EDN: BRQHYM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В настоящее время развитие магноники [1, 2], направленное на исследование процессов переноса магнитного момента или спина электрона вместо переноса заряда, открывает новые возможности применения спиновых волн (СВ) для построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации в микроволновом и терагерцевом диапазонах [3, 4]. В таких устройствах информационный сигнал кодируется в фазе или амплитуде СВ, а логические операции реализованы на основе принципов спин-волновой интерференции [3]. В качестве магнитного материала, используемого для формирования магнитных волноведущих структур, используются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ (YIG)), демонстрирующие рекордно низкие величины затухания СВ, в том числе при нанометровых толщинах ЖИГ [1]. Пленки ЖИГ могут быть получены методами жидкофазной эпитаксии [5], техникой лазерного

напыления [6] или вакуумным ионным распылением [7, 8].

Одним из возможных подходов к управлению спиновыми волнами является использование двумерных массивов магнитных наноструктур [9]. Эти массивы могут изменять характеристики спиновых волн, включая их дисперсионные свойства и распространение [9]. В частности, массивы магнитных цилиндров/полуцилиндров представляют особый интерес, так как можно варьировать их геометрию и магнитные свойства, что открывает возможности для более разностороннего управления параметрами спиновых волн.

Численное микромагнитное моделирование [10] играет ключевую роль в изучении характеристик спиновых волн в сложных структурах. Микромагнитное моделирование позволяет не только глубже понять основные механизмы взаимодействия спиновых волн с магнитными наноструктурами, но и исследовать влияние геометрии элементов на их



эффективность управления спиновыми волнами и затухание.

В рамках данной работы проведено численное микромагнитное моделирование микроволновода с массивом цилиндров и полуцилиндров из магнетита, расположенных на его поверхности. Особое внимание уделено варьированию геометрических параметров наноструктур, таких как диаметр цилиндров/полуцилиндров, а также направления внешнего магнитного поля, что позволяет выявить их влияние на характеристики распространения спиновых волн. Магнетит [11] был выбран в качестве материала для наноструктур благодаря его уникальным магнитным свойствам и совместимости с современными технологиями создания микро- и наноструктур [12].

Полученные результаты моделирования показывают возможность управления поведением спиновых волн в зависимости от геометрии магнитных элементов и направления внешнего магнитного поля, что открывает новые возможности для разработки высокоэффективных устройств магноники.

1. Методы и материалы

Рассматриваемые структуры показаны на рис. 1. Они представляют собой микровол-

новод с массивом цилиндров/полуцилиндров (рис. 1, а, б) на поверхности. Микроволновод выполнен из пленки ЖИГ ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) длиной $L_2 = 4$ мм, шириной $L_1 = 300$ мкм и толщиной $w = 10$ мкм. Цилиндры/полуцилиндры были выполнены из магнетита (Fe_3O_4) толщиной 10 мкм, диаметром $d = 5$ и 10 мкм. Массив цилиндров/полуцилиндров располагался в области $L_3 = 1$ мм \times 300 мкм, расположенной от начала координат Ox на расстоянии 1.5 мм. Расстояние между цилиндрами/полуцилиндрами в каждом случае $u = 10$ мкм, а $k = u + d/2$ мкм. При $d = 5$ мкм в область L_3 помещался массив 66×20 (количество по $Ox \times Oy$) микроэлементов, а при $d = 10$ мкм вмещался 50×15 .

С помощью микромагнитного моделирования, основанного на решении уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта (ЛЛГ) [10], было проведено исследование режимов распространения СВ в структурах с различной геометрией магнетита (см. рис. 1). Уравнение ЛЛГ можно представить в виде:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{H}_{eff} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha}{M_s(x,y)} \left[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right],$$

где \mathbf{M} – вектор намагниченности, α – параметр затухания, $\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{demag} + \mathbf{H}_{ex}$ – эффективное магнитное поле, \mathbf{H}_0 – внешнее магнитное

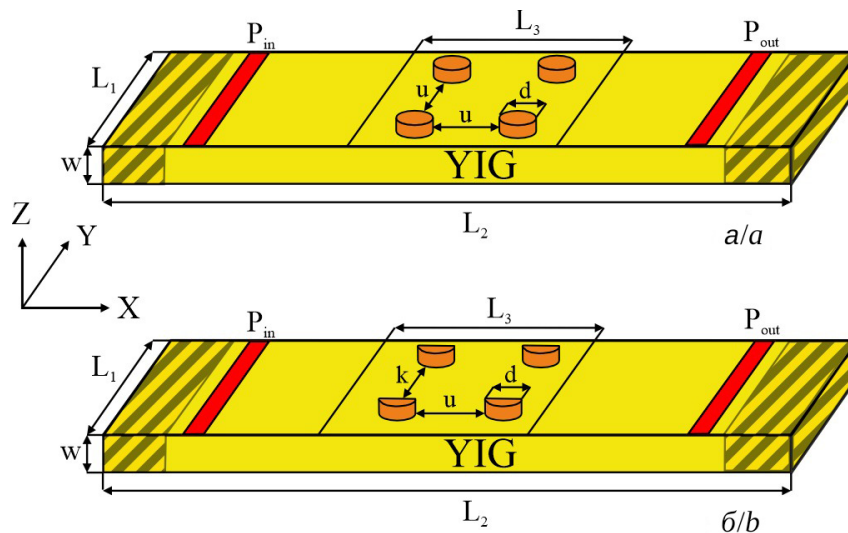


Рис. 1. Схематическое изображение структур с магнетитом в форме цилиндра (а) и полуцилиндра (б): L_1 – ширина ЖИГ микроволновода, L_2 – длина ЖИГ микроволновода, L_3 – область нанесения массива магнетита, w – толщина ЖИГ микроволновода, d – диаметр цилиндра, u, k – расстояния между цилиндрами/полуцилиндрами, P_{in} и P_{out} – антенны для возбуждения и приема СВ соответственно (цвет онлайн)

Fig. 1. Schematic representation of structures with magnetite in the form of a cylinder (a) and a half-cylinder (b): L_1 is the width of the YIG microwave guide, L_2 is the length of the YIG microwave guide, L_3 is the area where the magnetite array is deposited, w is the thickness of the YIG microwave guide, d is the diameter of the cylinder, u, k are distances between the cylinders/half-cylinders, P_{in} and P_{out} are antennas for excitation and taking SW, respectively (color online)



поле, \mathbf{H}_{demag} – поле размагничивания, \mathbf{H}_{ex} – обменное поле, $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение. Параметры затухания пленки ЖИГ и магнетита равны $5 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-2}$ соответственно. Константа обмена в пленке ЖИГ составляет $A_{ex1} = 3.612$ пДж/м, а в магнетите $A_{ex2} = 1.210$ пДж/м. Намагниченности насыщения ЖИГ и магнетита составляют $4\pi M_{YIG} = 1750$ Гс и $4\pi M_{Mag} = 6000$ Гс соответственно. Структура была помещена в однородное статическое магнитное поле $H_0 = 1200$ Э, направленное по Oy для эффективного возбуждения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ). Рассматривались случаи, когда внешнее магнитное поле было направлено в положительном и отрицательном направлении по Oy . В случае положительного направления волна была «прижата» к границе ЖИГ-магнетит, в случае отрицательного – к нижней границе ЖИГ.

Для возбуждения СВ импульсом к пленке ЖИГ в области входной антенны P_{in} прикладывалось магнитное поле $h_z(t) = h_0 \text{sinc}(2\pi f_m t)$, где центральная частота $f_m = 6$ ГГц, $h_0 = 0.001$ Э. Для возбуждения СВ на определенной частоте к пленке ЖИГ в области входной антенны P_{in} прикладывалось магнитное поле $h_z(t) = h_1 \sin(2\pi f_p t)$, где f_p – конкретная частота, $h_1 = 8 \cdot 10^{-5}$ Э. Затем, в обоих случаях, значение динамической намагниченности $m_z(x, y, t)$ в области выходной секции P_{out} записывалось с шагом $\Delta t = 20$ пс в течение времени $T = 300$ нс, что достаточно для достижения устойчивого состояния. Возбуждение СВ импульсом требовалось, чтобы в дальнейшем

с помощью быстрого преобразования Фурье [13] из временной зависимости намагниченности получить амплитудно-частотную характеристику. Возбуждение на определенной частоте требовалось для построения пространственного распределения интенсивности СВ по формуле $I = \sqrt{m_x^2 + m_z^2} / I_{\max}$, где I_{\max} – это максимальное значение интенсивности СВ.

Значения $m_z(x, y, t)$ рассчитывались для всех ячеек по формуле $m_z(x, y, t) = m_z(x, y, t) m_z(x, y, 0)$, где $m_z(x, y, 0)$ соответствует основному состоянию. Для уменьшения отражений СВ от границ расчетной области были введены поглощающие слои с геометрически возрастающим коэффициентом α (заштрихованные области на рис. 1) [14, 15]. Размер ячейки сетки был $2 \times 2 \times 1$ мкм³.

2. Полученные результаты

Был произведен расчет внутренних полей размагничивания в каждой структуре. На рис. 2 показано распределение внутреннего поля в пленке ЖИГ с магнетитом различной геометрии в слое $zs = 10$ мкм. Можно заметить, что магнетит создает неоднородность во внутреннем поле пленки ЖИГ.

Для получения информации о том, что происходило с волной после взаимодействия с массивом магнетита различной геометрии, был проведен расчет спектральной плотности мощности спин-волнового сигнала. На рис. 3 изображены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для рассматриваемых структур при

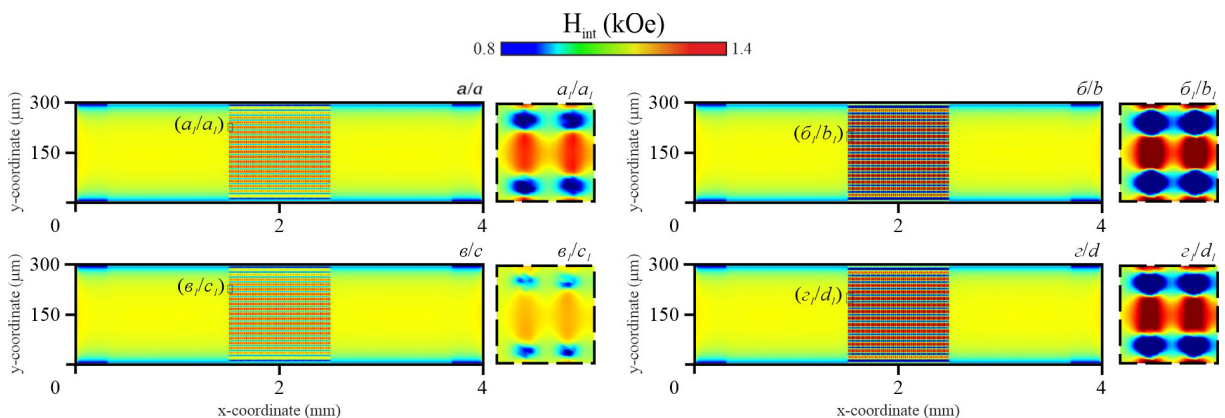


Рис. 2. Распределение внутреннего поля для пленки ЖИГ с цилиндрами/полуцилиндрами ($a, b/c, d$) при $d = 5$ мкм (a, c) и $d = 10$ мкм (b, d). Увеличенная область неоднородности (a_1, b_1, c_1, d_1) для микроэлементов $e_{15}, e_{16}, e_{25}, e_{26}$ (e_{nm} , где n/m – номер ряда/строки) (цвет онлайн)

Fig. 2. Distribution of the internal field for YIG film with cylinders/half-cylinders ($a, b/c, d$) at $d = 5 \mu\text{m}$ (a, c) and $d = 10 \mu\text{m}$ (b, d). Increased area of heterogeneity (a_1, b_1, c_1, d_1) for microelements $e_{15}, e_{16}, e_{25}, e_{26}$ (e_{nm} , where n/m is the row/line number) (color online)

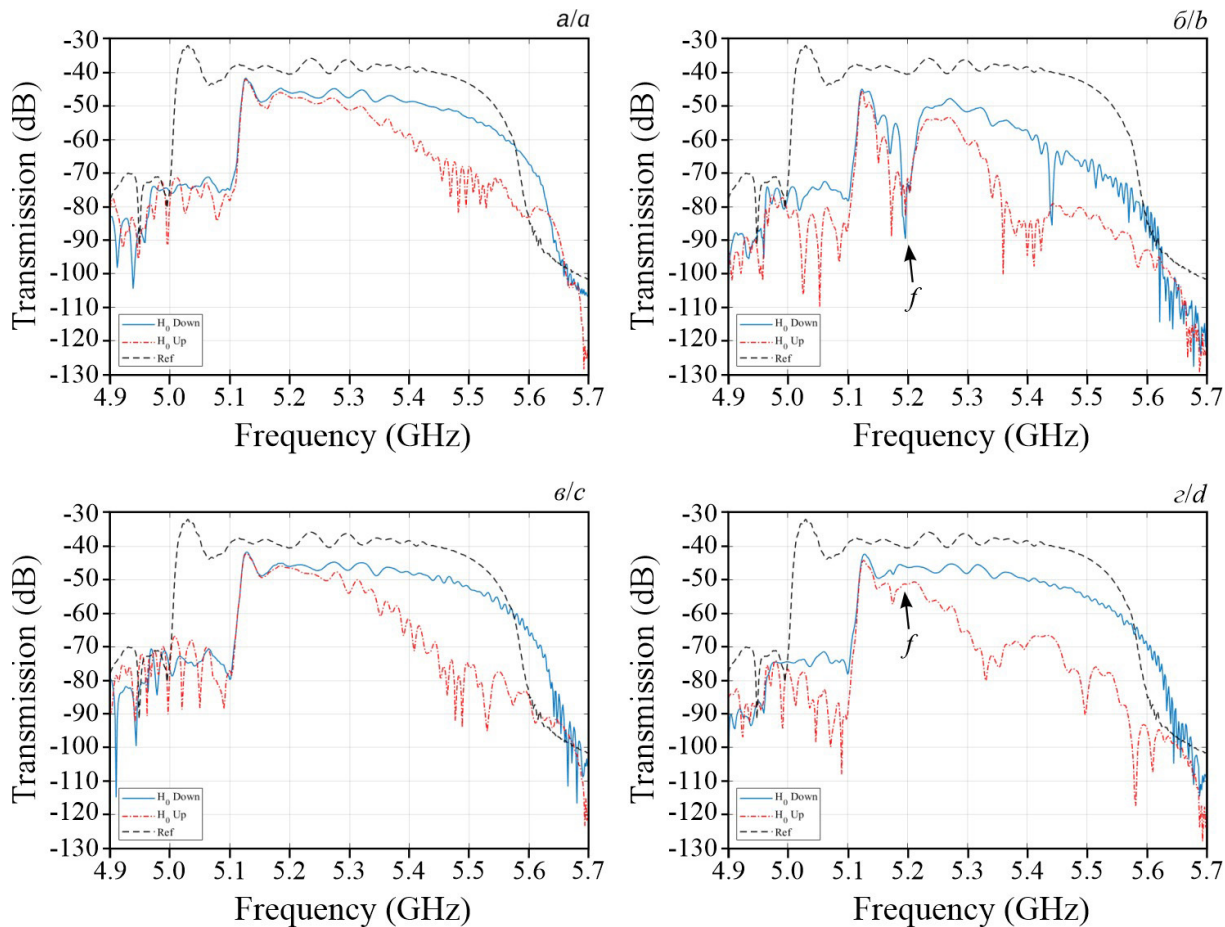


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики для пленки ЖИГ с цилиндрами/полуцилиндрами (а, б/в, г) при $d = 5$ мкм (а, в) и $d = 10$ мкм (б, г), когда магнитное поле было направлено в положительном (штрихпунктирная линия) и отрицательном (сплошная линия) направлениях по Oy (цвет онлайн)

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics for YIG film with cylinders/half-cylinders (a, b/c, d) at $d = 5 \mu\text{m}$ (a, c) and $d = 10 \mu\text{m}$ (b, d), when the magnetic field was directed in positive (dash-dotted line) and negative (solid line) directions along Oy (color online)

вариации направления магнитного поля. Сплошная/штрихпунктирная линия соответствует отрицательному/положительному направлению магнитного поля. Штриховая линия соответствует АЧХ для пленки ЖИГ без магнетита при H_0 , ориентированном в отрицательном направлении Oy . При $d = 5$ мкм и изменении формы магнетита АЧХ качественно совпадают (см. рис. 3, а, в). При этом в случае положительного направления поля (что отвечает «прижатию» ПМСВ к границе ЖИГ-магнетит) ПМСВ испытывала дополнительное ослабление, которое было тем сильнее, чем выше частота. При увеличении диаметра до 10 мкм, в случае магнетита в форме цилиндра, можно пронаблюдать возникновение провалов как при положительном, так и при отрицательном направлении внешнего магнитного поля по Oy .

В случае магнетита в форме полуцилиндра возникновение провалов возможно лишь при положительном направлении H_0 по Oy . В зависимости от геометрии магнетита наблюдается возможность управления спектром прохождения путем изменения направления внешнего магнитного поля.

При изменении формы магнетита на рис. 3, б, г можно выделить частоту $f = 5.195$ ГГц, на которой в случае цилиндров возникает провал. Посмотрим, что происходит со спиновой волной на данной частоте. Для этого построим пространственные распределения интенсивности СВ для пленки ЖИГ с магнетитом различной формы при изменении ориентации H_0 по Oy (рис. 4).

На рис. 4, а, б видно, что СВ на частоте f затухает сильнее после прохождения массива

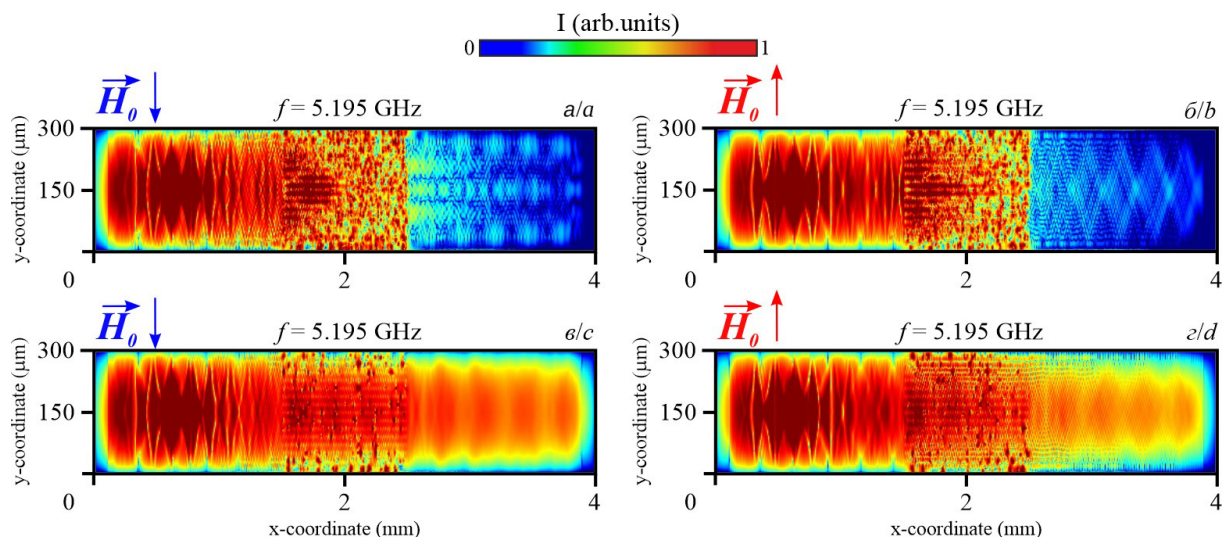


Рис. 4. Пространственные распределения интенсивности спиновой волны для пленки ЖИГ с цилиндрами/полуцилиндрами (а, б/в, г) для частоты входного сигнала $f = 5.195$ ГГц при $d = 10$ мкм, в случае магнитного поля, ориентированного в отрицательном (а, в) и положительном (б, г) направлениях по Oy (цвет онлайн)

Fig. 4. Spatial distributions of the spin wave intensity for YIG film with cylinders/half-cylinders (a, b/c, d) for an input signal frequency $f = 5.195$ GHz at $d = 10$ μm , in the case of a magnetic field oriented in negative (a, c) and positive (b, d) directions according to Oy (color online)

магнетита в форме цилиндров. Это происходит из-за большей плотности поглощающего покрытия. Причем стоит заметить, что в области после массива магнетита (см. рис. 4, а) наблюдается локализация мощности спиновой волны в виде полос, при этом такой эффект оказывается возможным только лишь при \vec{H}_0 , ориентированном в отрицательном направлении Oy . На рис. 4, в, г спиновая волна проходит массив магнетита в форме полуцилиндров и при изменении ориентации внешнего магнитного поля по Oy пространственные распределения интенсивности СВ качественно совпадают.

Заключение

В статье исследованы процессы управления распространением спиновых волн в микроволноводе с двумерным массивом цилиндров и полуцилиндров из магнетита, расположенных на поверхности пленки ЖИГ. Проведенное численное микромагнитное моделирование продемонстрировало возможность изменения характеристик СВ за счет варьирования геометрии магнетита и ориентации внешнего магнитного поля. Установлено, что изменение диаметра цилиндров и полуцилиндров, а также направление внешнего магнитного поля влияют на амплитудно-частотные характеристики.

Результаты показывают, что изменение геометрии магнетита и внешних условий позволяют

управлять параметрами СВ, открывая новые возможности для создания высокоэффективных устройств магноники. Важным аспектом исследования является техническая реализуемость таких структур, учитывая современные методы микро- и нанолитографии.

Кроме того, магнетит, используемый в качестве материала для метаповерхности, обладает уникальными магнитными свойствами и широким спектром применения в биомедицине [16–19] и сенсорных технологиях [20, 21]. Его биосовместимость [22] и возможность функционализации [17] делают магнетит перспективным материалом для разработки сенсоров и устройств, применяемых в диагностике и лечении биологических систем. Таким образом, представленные результаты могут найти применение не только в магнонике, но и в смежных областях, таких как биомедицинская инженерия и сенсорика, расширяя горизонты использования СВ и магнитных наноструктур.

Список литературы

1. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.
2. Chumak A. V., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelman C., Adeyeye A. O., Åkerman J., Aliev F. G., Anane A., Awad A., Back C. H., Barman A., Bauer G. E. W., Becherer M., Begenin E. N., Bittencourt V. A. S. V., Blanter Y. M., Bortolotti P., Boventer I., Bozhko D. A. et al. Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave



- Computing // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58, № 6. Art. 0800172. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>
3. Stancil D. D., Prabhakar A. Spin Waves: Theory and Applications. New York : Springer, 2009. 348 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77865>
4. Wang Q., Kewenig M., Schneider M., Verba R., Kohl F., Heinz B., Geilen M., Mohseni M., Lägler B., Ciubotaru F., Adelmann C., Dubs C., Cotozana S. D., Dobrovolskiy O. V., Brächer T., Pirro P., Chumak A. V. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders // Nature Electronics. 2020. Vol. 3. P. 765–774. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00485-6>
5. Shone M. The technology of YIG film growth // Circuits Systems and Signal Process. 1985. Vol. 4. P. 89–103. <https://doi.org/10.1007/BF01600074>
6. Sokolov N. S., Fedorov V. V., Korovin A. M., Suturin S. M., Baranov D. A., Gastev S. V., Krichevskiy B. B., Maksimova K. Yu., Grunin A. I., Bursian V. E., Lutsev L. V., Tabuchi M. Thin yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition: Crystal structure, static, and dynamic magnetic properties // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 119, iss. 2. Art. 023903. <https://doi.org/10.1063/1.4939678>
7. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films on Si substrates // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118, № 2. Art. 023905. <https://doi.org/10.1063/1.4926475>
8. Stognij A., Lutsev L., Novitskii N., Bespalov A., Golikova O., Ketsko V., Gieniusz R., Maziewski A. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films sputtered on GaN-based substrates // Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48, № 48. Art. 485002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485002>
9. Амельченко М. Д., Бир А. С., Огрин Ф. Ю., Одинцов С. А., Романенко Д. В., Садовников А. В., Никитов С. А., Гришин С. В. Магнитные метаповерхности с металлическими включениями // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5. С. 563–591. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003007>
10. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Waeyenberge B. The design and verification of MuMax3 // AIP Advances. 2014. Vol. 4, iss. 8. Art. 107133. <https://doi.org/10.1063/1.4899186>
11. Niculescu A.-G., Chircov C., Grumezescu A. M. Magnetite nanoparticles: Synthesis methods – A comparative review // Methods. 2022. Vol. 199. P. 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2021.04.018>
12. Trifoi A. R., Matei E., Râpă M., Berbecaru A.-C., Panaitescu C., Banu I., Doukeh R. Coprecipitation nanoarchitectonics for the synthesis of magnetite: A review of mechanism and characterization // Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 2023. Vol. 136. P. 2835–2874. <https://doi.org/10.1007/s11144-023-02514-9>
13. Hu J., Jia F., Liu W. Application of Fast Fourier Transform // High Science and Technology. 2023. Vol. 38. P. 590–597. <https://doi.org/10.54097/hset.v38i.5888>
14. Venkat G., Fangohr H., Prabhakar A. Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. Vol. 450. P. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.057>
15. Dvornik M., Kuchko A. N., Kruglyak V. V. Micromagnetic method of s-parameter characterization of magnonic devices // Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 109, iss. 7. Art. 07D350. <https://doi.org/10.1063/1.3562519>
16. Bustamante-Torres M., Romero-Fierro D., Estrella-Núñez J., Arcenales-Vera B., Chichande-Proañño E., Bucio E. Polymeric Composite of Magnetite Iron Oxide Nanoparticles and Their Application in Biomedicine: A Review // Polymers. 2022. Vol. 14. Art. 752. <https://doi.org/10.3390/polym14040752>
17. Ganapathie L. S., Mohamed M. A., Mohamad Yunus R., Berhanuddin D. D. Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles in Biomedical Application: From Synthesis to Surface Functionalisation // Magnetochemistry. 2020. Vol. 6, iss. 4. Art. 68. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068>
18. Włodarczyk A., Gorgoń S., Radoń A., Bajdak-Rusinek K. Magnetite Nanoparticles in Magnetic Hyperthermia and Cancer Therapies: Challenges and Perspectives // Nanomaterials. 2022. Vol. 12, iss. 11. Art. 1807. <https://doi.org/10.3390/nano12111807>
19. Petrov K. D., Chubarov A. S. Magnetite Nanoparticles for Biomedical Applications // Encyclopedia. 2022. Vol. 2, iss. 4. P. 1811–1828. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2040125>
20. Bilgic A., Cimen A. Two Novel BODIPY-Functional Magnetite Fluorescent Nano-Sensors for Detecting of Cr(VI) Ions in Aqueous Solutions // Journal of Fluorescence. 2020. Vol. 30, № 4. P. 867–881. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02559-2>
21. Bilgic A., Cimen A. A Highly Sensitive and Selective ON-OFF Fluorescent Sensor Based on Functionalized Magnetite Nanoparticles for Detection of Cr(VI) Metal Ions in the Aqueous Medium // Journal of Molecular Liquids. 2020. Vol. 312. Art. 113398. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113398>
22. Mbeh D. A., França R., Merhi Y., Zhang X. F., Veres T., Sacher E., Yahia L. In Vitro Biocompatibility Assessment of Functionalized Magnetite Nanoparticles: Biological and Cytotoxicological Effects // Journal of Biomedical Materials Research. Part A. 2012. Vol. 100A. P. 1637–1646. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.34096>

References

1. Gurevich A. G. *Magnitny rezonans v ferritakh i antiferromagnitakh* [Magnetic resonance in ferrites and antiferromagnets]. Moscow, Nauka, 1973. 591 p. (in Russian).
2. Chumak A. V., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelmann C., Adeyeye A. O., Åkerman J., Aliev F. G., Anane A., Awad A., Back C. H., Barman A., Bauer G. E. W., Becherer M., Beginin E. N., Bittencourt V. A. S. V.,



- Blanter Y. M., Bortolotti P., Boventer I., Bozhko D. A., et al. Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave Computing. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022, vol. 58, no. 6, art. 0800172. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>
3. Stancil D. D., Prabhakar A. *Spin Waves: Theory and Applications*. New York, Springer, 2009. 348 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77865>
4. Wang Q., Kewenig M., Schneider M., Verba R., Kohl F., Heinz B., Geilen M., Mohseni M., Lagel B., Ciubotaru F., Adelmann C., Dubs C., Cotofana S. D., Dobrovolskiy O. V., Bracher T., Pirro P., Chumak A. V. A magnonic directional coupler for integrated magnonic half-adders. *Nature Electronics*, 2020, vol. 3, pp. 765–774. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00485-6>
5. Shone M. The technology of YIG film growth. *Circuits Systems and Signal Process*, 1985, vol. 4, pp. 89–103. <https://doi.org/10.1007/BF01600074>
6. Sokolov N. S., Fedorov V. V., Korovin A. M., Suturin S. M., Baranov D. A., Gastev S. V., Krichevstov B. B., Maksimova K. Yu., Grunin A. I., Bursian V. E., Lutsev L. V., Tabuchi M. Thin yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition: Crystal structure, static, and dynamic magnetic properties. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 119, no. 2, art. 023903. <https://doi.org/10.1063/1.4939678>
7. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films on Si substrates. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 118, no. 2, art. 023905. <https://doi.org/10.1063/1.4926475>
8. Stognij A., Lutsev L., Novitskii N., Besspalov A., Golikova O., Ketsko V., Gieniusz R., Maziewski A. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films sputtered on GaN-based substrates. *J. Appl. Phys. D: Applied Physics*, 2015, vol. 48, no. 48, art. 485002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485002>
9. Amel'chenko M. D., Bir A. S., Ogrin F. Y., Odintsov S. A., Romanenko D. V., Sadovnikov A. V., Nikitov S. A., Grishin S. V. Magnetic metasurfaces with metallic inclusions. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 30, no. 5, pp. 563–591. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003007>
10. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Waeyenberge B. The design and verification of MuMax3. *AIP Advances*, 2014, vol. 4, art. 107133. <https://doi.org/10.1063/1.4899186>
11. Niculescu A.-G., Chircov C., Grumezescu A. M. Magnetite nanoparticles: Synthesis methods – A comparative review. *Methods*, 2022, vol. 199, pp. 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2021.04.018>
12. Trifoi A. R., Matei E., Rapa M., Berbecaru A.-C., Panaitescu C., Banu I., Doukeh R. Coprecipitation nanoarchitectonics for the synthesis of magnetite: A review of mechanism and characterization. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2023, vol. 136, pp. 2835–2874. <https://doi.org/10.1007/s11144-023-02514-9>
13. Hu J., Jia F., Liu W. Application of Fast Fourier Transform. *HSET*, 2023, vol. 38, pp. 590–597. <https://doi.org/10.54097/hset.v38i.5888>
14. Venkat G., Fangohr H., Prabhakar A. Absorbing boundary layers for spin wave micromagnetics. *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 450, pp. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.057>
15. Dvornik M., Kuchko A. N., Kruglyak V. V. Micromagnetic method of s-parameter characterization of magnonic devices. *J. Appl. Phys.*, 2011, vol. 109, iss. 7, art. 07D350. <https://doi.org/10.1063/1.3562519>
16. Bustamante-Torres M., Romero-Fierro D., Estrella-Nuez J., Arcentales-Vera B., Chichande-Proao E., Bucio E. Polymeric Composite of Magnetite Iron Oxide Nanoparticles and Their Application in Biomedicine: A Review. *Polymers*, 2022, vol. 14, art. 752. <https://doi.org/10.3390/polym14040752>
17. Ganapathie L. S., Mohamed M. A., Mohamad Yunus R., Berhanuddin D. D. Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles in Biomedical Application: From Synthesis to Surface Functionalisation. *Magnetochemistry*, 2020, vol. 6, iss. 4, art. 68. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068>
18. Wodarczyk A., Gorgon S., Radon A., Bajdak-Rusinek K. Magnetite Nanoparticles in Magnetic Hyperthermia and Cancer Therapies: Challenges and Perspectives. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, iss. 11, art. 1807. <https://doi.org/10.3390/nano12111807>
19. Petrov K. D., Chubarov A. S. Magnetite Nanoparticles for Biomedical Applications. *Encyclopedia*, 2022, vol. 2, iss. 4, pp. 1811–1828. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2040125>
20. Bilgic A., Cimen A. Two Novel BODIPY-Functional Magnetite Fluorescent Nano-Sensors for Detecting of Cr(VI) Ions in Aqueous Solutions. *J. Fluoresc.*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 867–881. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02559-2>
21. Bilgic A., Cimen A. A highly sensitive and selective ON-OFF fluorescent sensor based on functionalized magnetite nanoparticles for detection of Cr(VI) metal ions in the aqueous medium. *J. Molecular Liquids*, 2020, vol. 312, art. 113398. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113398>
22. Mbeh D. A., Franca R., Merhi Y., Zhang X. F., Veres T., Sacher E., Yahia L. In vitro biocompatibility assessment of functionalized magnetite nanoparticles: Biological and cytotoxicological effects. *J. Biomed. Mater. Res. Part A*, 2012, vol. 100A, pp. 1637–1646. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.34096>

Поступила в редакцию 01.03.2024; одобрена после рецензирования 01.10.2024;
принята к публикации 03.10.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 01.03.2024; approved after reviewing 01.10.2024;
accepted for publication 03.10.2024; published 31.03.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 12–23

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 12–23

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-12-23>, EDN: FAAPBH

Научная статья

УДК 537.874

Частотные зависимости и диаграммы рассеяния комбинированных металлодиэлектрических поверхностей в диапазоне 16–25 ГГц



А. С. Мазинов[✉], Н. А. Болдырев, М. М. Падалинский, И. Ш. Фитаев, А. В. Старосек

Физико-технический институт Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, Россия, 295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4

Мазинов Алим Сеит-Аметович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой радиофизики и электроники, mazinovas@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8015-8841>, AuthorID: 754027

Падалинский Михаил Михайлович, специалист кафедры радиофизики и электроники, m.padalinskiy@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9691-4066>, AuthorID: 1174357

Болдырев Николай Алексеевич, аспирант кафедры радиофизики и электроники, kolyaboldyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1804-4784>, AuthorID: 1228998

Фитаев Ибраим Шевкетович, преподаватель кафедры радиофизики и электроники, fitaev.i@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2426-3692>, AuthorID: 1013098

Старосек Александр Викторович, старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники, starosekav@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9688-7598>, AuthorID: 1055717

Аннотация. Разрабатываются компактные рассеивающие материалы, представляющие собой комбинацию из плоскостных метаструктур с тонкими наноразмерными пленками. Такие материалы предназначаются для защитных покрытий зданий и сооружений в целях снижения уровня прошедшего электромагнитного излучения, но при этом с малым коэффициентом отражения в диапазоне частот 16–25 ГГц. Низкий уровень сигнала, отраженного от подобного покрытия, будет способствовать улучшению электромагнитной обстановки и гигиенических норм вблизи передающих радиотехнических объектов. Метаструктуры представляют собой набор особым образом расположенных субволновых металлических или диэлектрических структур, которые резонансно взаимодействуют с электрическими или магнитными составляющими падающих электромагнитных волн. Электромагнитные свойства подобных структур в основном определяются характеристиками резонаторов и их взаимным расположением, что позволяет получить эффективный электромагнитный отклик, который недостижим в естественных материалах. В качестве источника омических потерь в работе были исследованы металлические пленки. Тонкопленочные материалы, применявшиеся в комбинации с метаструктурами, представляли собой подложку из стекла или ситалла с нанесенным на них функциональным слоем. Благодаря островковой структуре, формирующейся при определенной толщине проводящего материала, такие пленки позволили поглощать до 35% падающего излучения. Результаты исследований демонстрируют, что величина нормальной составляющей отраженной электромагнитной волны значительно снижается на резонансной частоте 18.8 ГГц благодаря применению комбинации данных ослабляющих покрытий. На этой частоте коэффициент ослабления достигает своего пикового значения – 97.8% от падающей волны. Ширина данного резонансного пика, при котором ослабление волны достигает не менее 70% составляет 450 МГц. Также следует отметить, что добавление резистивной пленки сдвигает резонансные пики в более высокочастотную область.

Ключевые слова: комбинированные системы рассеивания, расширение частотной полосы поглощения, уменьшения нормальной составляющей отраженной волны, паразитное переотражение

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-00261).

Для цитирования: Мазинов А. С., Болдырев Н. А., Падалинский М. М., Фитаев И. Ш., Старосек А. В. Частотные зависимости и диаграммы рассеяния комбинированных металлодиэлектрических поверхностей в диапазоне 16–25 ГГц // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 12–23. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-12-23>, EDN: FAAPBH

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Frequency dependencies and scattering diagrams of combined metal-dielectric surfaces in frequency range of 16–25 GHz

A. S. Mazinov[✉], M. M. Padalinsky, N. A. Boldyrev, I. Sh. Fitaev, A. V. Starosek

Physical-Technical Institute of V. I. Vernadsky Crimean Federal University, 4 Prospekt Vernadskogo, Simferopol 295007, Republic of Crimea, Russia

© Мазинов А. С., Болдырев Н. А., Падалинский М. М., Фитаев И. Ш., Старосек А. В., 2025



Alim S. Mazinov, mazinovas@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8015-8841>, AuthorID: 754027
 Mikhail M. Padalinsky, m.padalinskiy@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9691-4066>, AuthorID: 1174357
 Nikolay A. Boldyrev, kolyaboldyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1804-4784>, AuthorID: 1228998
 Ibraim Sh. Fitaev, fitaev.i@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2426-3692>, AuthorID: 1013098
 Aleksandr V. Starosek, starosekav@cfuv.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9688-7598>, AuthorID: 1055717

Abstract. Background and Objectives: It is known that the design of attenuating coatings is usually based on two main physical principles: scattering and absorption. The absorbing coatings include ultrathin films, which at nanoscale thicknesses of the conductive layer absorb up to 50% of the incident electromagnetic energy, and are also capable of attenuating the signal in a wide frequency range due to frequency-independent properties. One of the ways to achieve high scattering readings is the use of metastructural coatings. This work aims to develop compact scattering materials that are a combination of planar metastructures with thin nanoscale films. Combining metastructures and thin absorbing nanofilms allows utilizing the advantages of both approaches, providing high efficiency of attenuation of electromagnetic waves in the microwave range. This opens up new opportunities for the creation of multifunctional and highly efficient attenuating coatings, which can find wide application in various industries and science. **Materials and Methods:** Metastructures are a set of specially arranged subwavelength metallic or dielectric structures that interact resonantly with the electric or magnetic components of incident electromagnetic waves. The electromagnetic properties of such structures are mainly determined by the characteristics of the resonators and their mutual arrangement. Such a construction principle allows them to exhibit an effective electromagnetic response, which is unattainable in natural materials. As a source of ohmic losses, thin films based on metallic, carbon and organic structures have been investigated in this work. Thin film materials used in combination with metastructures were a glass or sital substrate with a functional layer deposited on them via magnetron sputtering. Due to the island structure formed at a certain thickness of the conducting material, such films allowed absorbing up to 35% of the incident radiation. Glass-textolite with one-sided copper metallization was used as a material for obtaining the tested structures. The topology of the conductive structure was formed by milling. **Results:** The research results have demonstrated that the magnitude of the normal component of the reflected electromagnetic wave is significantly reduced at a resonant frequency of 18.8 GHz due to the use of combination of these attenuating coatings. At this frequency, the attenuation coefficient reaches its peak value of 97.8% of the incident wave. The width of this resonant peak, at which the attenuation of the wave reaches at least 70%, is 450 MHz. But it should also be noted that the addition of a resistive film has the property of shifting the resonant peaks to a higher frequency region. **Conclusion:** Such materials can be used as protective coatings for buildings and structures in order to reduce the level of the passed electromagnetic radiation, but with a low reflection coefficient in the frequency range of 16–25 GHz. The low level of signal reflected from such a coating will contribute to the improvement of the electromagnetic environment and hygienic standards in the vicinity of radio transmitting facilities.

Keywords: combined scattering systems, expansion of the partial absorption band, reduction of the normal component of the reflected wave, parasitic re-reflection

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-22-00261).

For citation: Mazinov A. S., Padalinsky M. M., Boldyrev N. A., Fitaev I. Sh., Starosek A. V. Frequency dependencies and scattering diagrams of combined metal-dielectric surfaces in frequency range of 16–25 GHz. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 12–23 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-12-23>, EDN: FAAPBH

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

С увеличением количества источников излучений в радиодиапазоне неуклонно растут требования к уменьшению паразитного излучения, возникающего при прямом отражении и переотражении электромагнитных (ЭМ) волн от автомобилей, крыш зданий и других объектов. Особенно это актуально с внедрением более высокочастотных каналов связи 5 и 6G, работающих на частотах до 300 ГГц [1]. В достаточно плотной городской застройке это может приводить к превышению санитарно-эпидемиологических норм [2]. Также данная проблема затрагивает предприятия, управление процессом автоматизации которых базируется на беспроводных локальных сетях [3]. Подобные предприятия используют автономные движущиеся агрегаты и платформы, которые требуют использования селективных радиоканалов, на работу которых значительное влияние оказывают переотражения

от металлических конструкций. Данная проблема актуальна и для предприятий с высоким уровнем автоматизации производства, где невозможно обойтись без использования отдельных радиоканалов для управления и связи внутри производственного помещения.

Традиционные методы снижения электромагнитного (ЭМ) фона, как правило, требуют объемных и сложных приспособлений и систем [4, 5]. Высокой компактностью выделяются планарные фазированные металлодиэлектрические покрытия, имеющие сложный геометрический рисунок слоя металлизации. Созданную специальным образом структуру из проводящих элементов можно представить как набор элементарных излучателей (с резонансом на определенной частоте), каждый из которых при взаимодействии с электромагнитными волнами различных диапазонов переизлучает определенным образом в зависимости от топологии резонаторов на поверхности [6–8]. Однако основным недостатком



подобных систем является их узкий рабочий диапазон в связи с ограничением линейных размеров планарных структур. Это и обуславливает применение объемных конструкций, размер которых сопоставим с рабочими длинами волн.

Одно из возможных решений данной проблемы заключается в использовании различных комбинаций элементарных резонаторов, образующих более сложную геометрию. Данный подход позволяет создать фазовые вихри [9], которые в свою очередь обеспечивают минимальную величину обратного рассеяния электромагнитной энергии, что позволяет добиться максимальных углов ее переизлучения [10].

Неоспоримым преимуществом двумерных фазированных систем является возможность управляемой гальванической связи отдельных резонаторов в составной матрице, что позволяет изменять их рабочие полосы частот. Следует отметить, что использование при этом в качестве управляющих элементов пленочных гетероструктур, сформированных на основе наноструктурированных углеродных или органических слоев, потенциально может снизить стоимость активных поглощающих и рассеивающих матриц [11–13].

В связи со сказанным основная цель настоящей работы состоит в выявлении спектральных и отражающих характеристик составных метаструктур выполненных в виде треугольной незамкнутой спирали, а также в оценке влияния дополнительного поглощающего слоя, созданного на основе тонкопленочных резистивных элементов поверх слоя метаматериала.

1. Постановка исследования, эксперимент

Ранее авторами были проведены исследования метаповерхностей, в которых элементарные ячейки представляют собой набор периодически расположенных диполей, обладающих строго заданными размерами [14]. В данной работе авторами описывается спроектированная ими более сложная по принципу своего построения метаструктура. Предложенная топология поверхности рассеивающей структуры позволяет добиться увеличения как количества отдельно взятых ярко выраженных пиков ослабления, так и общей ширины полосы частот, на которых бы наблюдалось ослабление отраженной от структуры электромагнитной волны. В качестве единичных резонаторов выступали двойные треугольные незамкнутые спирали. Выбор подобной симметрии обуславливается тем, что

в отличие от классических диполей данная структура обладает большим количеством различных емкостных и индуктивных связей – как внутри себя самой, так и с соседними элементами. Это позволяет увеличить как рассеивающие свойства составной метаповерхности, так и ширину ослабляемой полосы. Кроме того, наличие различной длины сторон треугольной спирали позволяет падающему ЭМ излучению различной частоты взаимодействовать с разными ее частями, что также приводит к увеличению широкополосности описанной выше структуры. В представленной работе размеры структуры рассчитывались для частоты 20.5 ГГц (длина волны $\lambda = 16.66$ мм). Выбор частоты обусловлен рабочим диапазоном оборотов, в частности, антенн П6–40, рабочий диапазон которых составляет 17.44–25.86 ГГц. Стороны фигуры кратны λ : малое основание равно $\lambda/8$, левая боковая сторона равна $\lambda/4$, правая – $\lambda/2$; толщина фигуры также составляет $\lambda/8$. Изображение изготовленной структуры, а также ее геометрические параметры представлены на рис. 1.

Для дополнительного уменьшения уровня мощности отраженной волны авторы настоящей работы использовали поглощающие элементы при построении комбинированной структуры наряду с метаповерхностью. В качестве поглощающего элемента в комбинированной поверхности использовался ряд пленочных структур, имеющих различный материал и толщину проводящего слоя. Рассматривались тонкопленочные металлизированные слои, осажденные методом магнетронного напыления, со средними толщинами в единицы нанометров. В качестве проводящих материалов использовались алюминий и медь [15, 16].

Для получения диаграмм обратного рассеяния исследуемых структур, был собран измерительный стенд, представленный на рис. 2.

Измерительный стенд состоял из синтезатора частот Г7М-40, выступающего в роли генератора электромагнитных волн, измерителя мощности PLS26-13М, фиксировавшего отраженную от исследуемой структуры мощность, а также из двух рупорных антенн П6–40, к которым были подключены представленные выше приборы через фазостабилизаторы для минимизации влияния их изгиба на измеряемые параметры. В качестве управляющего устройства выступал персональный компьютер.

Для получения экспериментальных зависимостей амплитуд отраженной волны от угла

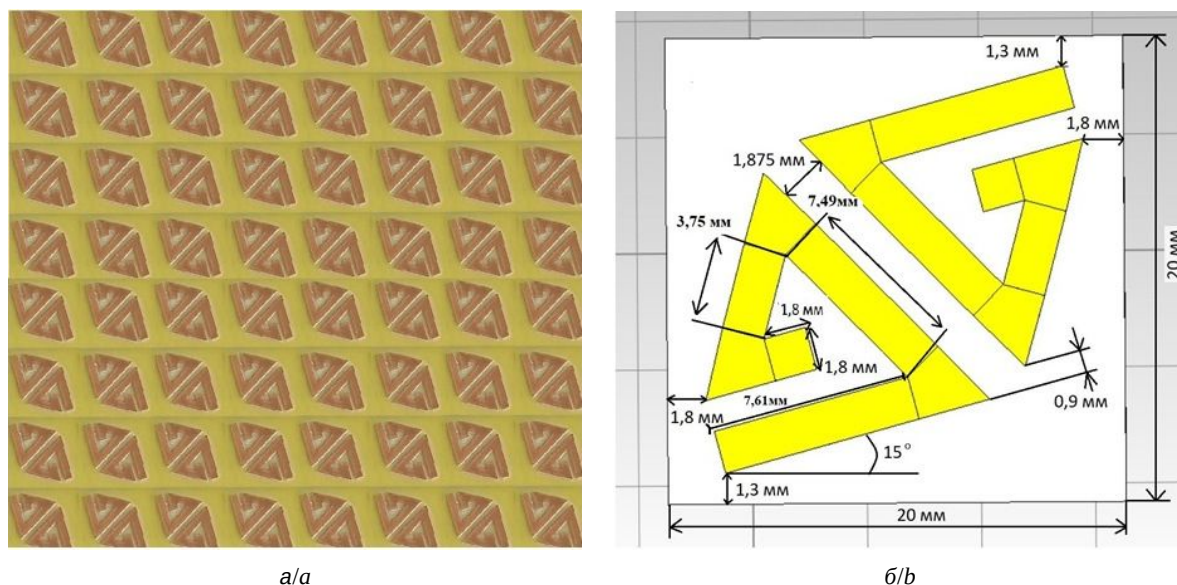


Рис. 1. Вид структуры (а) и геометрические параметры единичных резонаторов (б) (цвет онлайн)
Fig. 1. Image of the created structure (a) and geometric parameters of a single resonator (b) (color online)

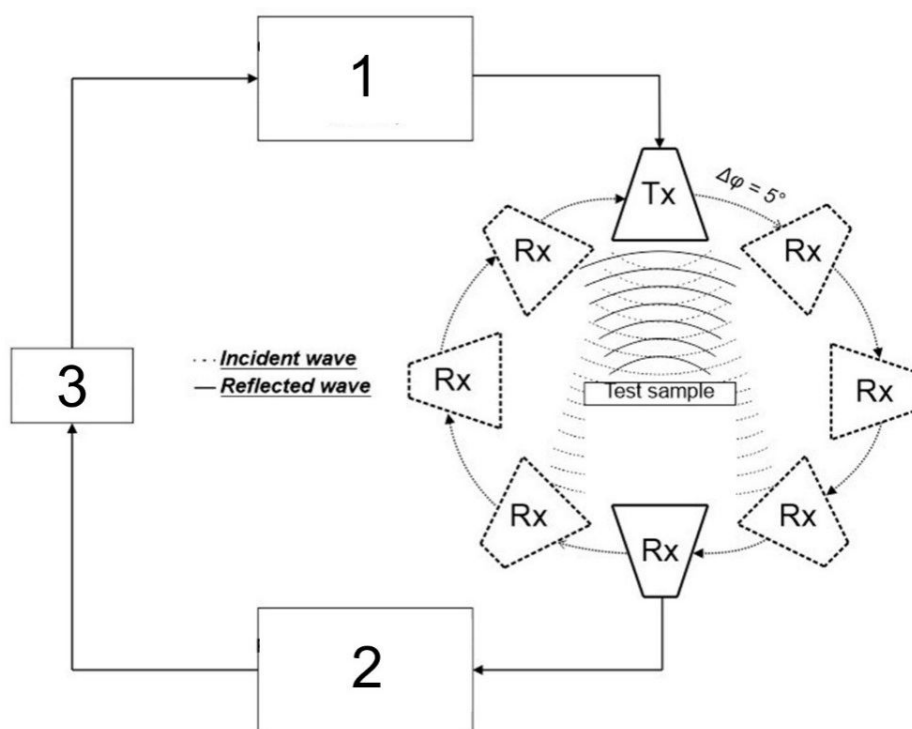


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор, 2 – измеритель мощности, 3 – компьютер, Tx – излучающая и Rx – приёмная антенны

Fig. 2. Block diagram of the experimental setup: 1 – generator, 2 – power meter, 3 – computer, Tx – transmitting and Rx – receiving antennas

отклонения приемного устройства использовался метод бистатического измерения. Излучающая антенна Tx фиксировалась в одном положении, обеспечивая падении волны по нормали относительно исследуемого образца. Линейно поляри-

зованная волна формировалась рупорной антенной П6–40, апертура которой составляла 625 см². Расстояние от раскрыва рупора до исследуемого образца составляла 16.8 см, что составляет более 10 длин волн нижней границы исследуемого диа-



пазона частот. Такое расстояние было выбрано исходя из задачи получения квазиплоского фронта падающей волны в дальней зоне, вследствие чего минимизируется влияние дифракционных явлений на измерения. Отраженная волна детектировалась идентичной рупорной антенной П6-40 путем проведения замеров отраженной мощности при последовательном перемещении приемной антенны Rx на 5 градусов по азимутальному углу θ при фиксированном полярном угле φ . Исследование представленных структур производилось в частотном диапазоне от 16 до 25 ГГц. Сама исследуемая структура располагалась на диэлектрическом держателе.

В качестве исследуемого образца выступала комбинированная поверхность, состоящая из сборной матрицы из 16 ячеек треугольной спиралевидной метаструктуры, поверх каждой из которой была расположена резистивная пленка. Далее рассматриваются результаты исследования частотных зависимостей подобных комбинированных поверхностей, показавших максимальные значения ослабления при максимальных углах рассеяния.

Показатель ослабления A являлся (в физическом смысле) упрощенным коэффициентом потерь в измеряемой плоскости и определялся из закона сохранения энергии в предположении, что сумма коэффициентов прохождения T , отражения R и ослабления A равна единице. При этом для экспериментального определения коэффициента прохождения T приемная антенна фиксировалась под углом в 180° относительно излучающей антенны. Первоначально было проведено измерение мощности для свободного пространства между антеннами, после чего на пути электромагнитной волны размещалась исследуемая метаструктура.

Поскольку металлизация на обратной стороне комбинированной структуры препятствовала прохождению волны, коэффициент прохождения T полагался равным нулю. Для определения коэффициента отражения приемная антенна фиксировалась параллельно излучающей антенне таким образом, что угол между ними составлял 0° . За эталон отражения бралось металлическое зеркало толщиной 0.6 мм, расположенное нормально к падающей волне. После чего на это же зеркало помещалась исследуемая метаструктура и фиксировалась отраженная мощность в нуле градусов между антеннами, а коэффициент отражения R рассчитывался как отношение мощ-

ностей отраженного излучения для структуры на зеркале и для зеркала: $R = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{зеркала}}}$.

2. Компьютерное моделирование исследуемого комбинированного покрытия

Для подтверждения полученных экспериментальных результатов, а также рассмотрения картины распределения токов на поверхности исследуемого образца было проведено компьютерное моделирование данной структуры. Для трехмерного моделирования вышеописанных метаповерхностей в режиме излучения и рассеяния использовался пакет CST Studio 2020 – раздел CST Microwave Studio, ориентированный на моделирование сложных объемных СВЧ-устройств (антенны, волноводы, радары и т. д.), включая средства построения прямоугольных, тетраэдральных и поверхностных сеток, которые подходят для моделирования различных высокочастотных явлений [17–20]. Для самой симуляции структуры задавался прямоугольный бокс с граничными условиями, представляющими собой открытое пространство. Порт, который является одновременно приемным и излучающим, расположен на расстоянии 150 мм от метаповерхности. Свободное пространство в самом боксе отстоит от поверхности структуры на 36 мм во всех направлениях, что соответствует нескольким длинам волн для средней частоты исследуемого диапазона, который составляет от 16 до 25 ГГц. Падающая волна распространялась по оси Z, имела линейную горизонтальную поляризацию по оси X и обеспечивала нормальное падение на исследуемый объект. Расстояние от исследуемой структуры до источника плоской волны составляло 160 мм. Для исследуемой структуры построение диаграмм обратного рассеяния рассчитывалось не на всех частотах, а лишь на характерных для нее частотах: 18.4, 19 и 19.6 ГГц. Принцип выбора характерных частот для дальнейшего рассмотрения диаграмм обратного рассеяния объясняется в наших предыдущих работах по изучению различного типа метаструктур и напрямую связан с полученными частотными характеристиками [14, 15].

Метаструктура состояла из нескольких слоев. В качестве подложки был выбран стеклотекстолит марки FR-4 толщиной 1.5 мм, с одной стороны которой располагалось металлическое зеркало толщиной не менее 1 мм, с другой стороны располагалась матрица из субволновых



резонаторов, сформированных в форме спиралевидного треугольника из меди толщиной 16 мкм. Общая матрица метаповерхности состояла из 16 подобных ячеек, каждая из которых имеет размер 20×20 мм (рис. 3, а). Поверх метаструктуры была расположена поглощающая резистивная пленка, нанесенная на стеклянную подложку, как показано на рис. 3, б.

При рассмотрении картины распределения пространственных токов по поверхности метаструктуры (на металлическом зеркале) на резонансной частоте можно увидеть, что в начальный момент времени основная часть энергии формируется на самих резонаторах параллельно вектору поляризации падающей волны, тем самым возбуждая в них токи (рис. 4, а). После чего происходит переизлучение накопленной энергии в пространство, вследствие чего начинается постепенный процесс формирования локальных максимумов и минимумов, располагающихся как в зазорах внутри самих резонаторов, так и в пространственном зазоре в области между соседними резонаторами (рис. 4, б). К следующему моменту времени формирование экстремумов пространственных токов достигает максимального значения (рис. 4, в). Из представленной картины поля явно видно, что основные ослабляющиеся процессы происходят в пространстве между четырьмя соседствующими ячейками и являются следствием наложения переизлученных волн между элементами. На финальном изобра-

жении (рис. 4, г). можно увидеть, что величина пространственных максимумов в центральной части начинается постепенно затухать, а ток на самих проводящих резонаторах достигает минимальных значений, что говорит о том, что вся энергия электромагнитного поля, возбужденная в резонаторах падающей электромагнитной волной, была переизлучена в пространство.

3. Сравнение частотных характеристик и диаграмм рассеяния

Использование разнообразных материалов в формировании комбинированной метаструктуры было продиктовано в первую очередь задачей снижения удельной себестоимости ослабляющего покрытия при расширении рабочего частотного диапазона и увеличении ослабляющих свойств. В результате вышеуказанного перебора комбинаций из различных поглощающих материалов был установлен схожий механизм их влияния на исследуемые характеристики – способность дополнительно влиять на ослабление отраженной волны путем поглощения падающего излучения. Однако следует отметить, что добавление дополнительного тонкопленочного проводящего слоя поверх метаструктуры приводит к появлению емкостной нагрузки между пленками и металлическими резонаторами на поверхности метаструктуры, что в свою очередь заметно сдвигает всю частотную характеристи-

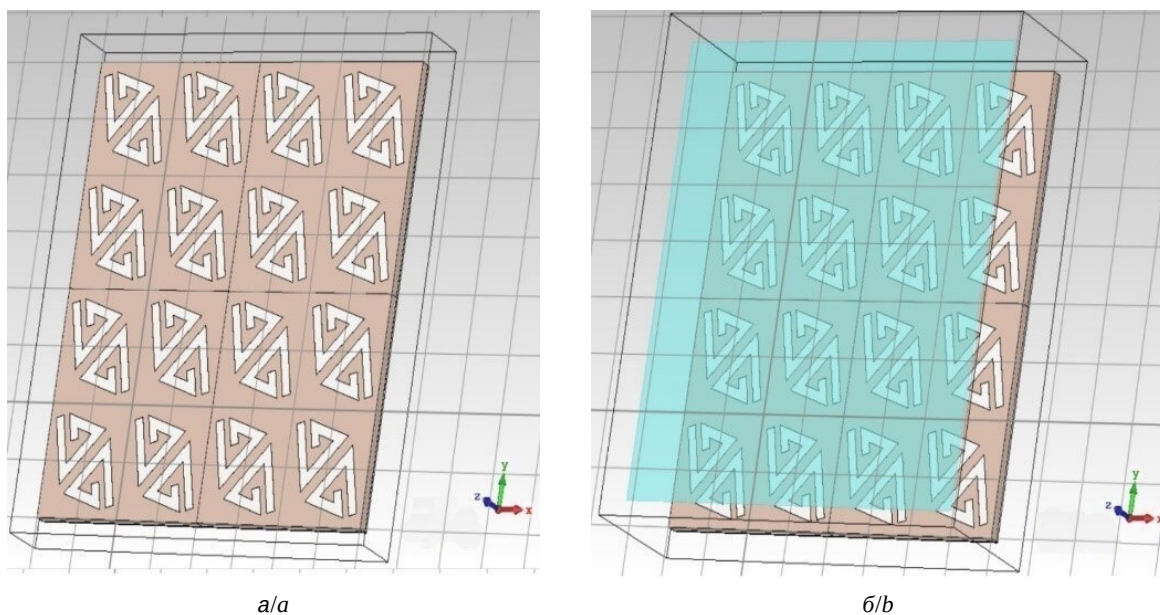


Рис. 3. Промоделированные структуры: а – треугольники без пленки; б – треугольники с пленкой (цвет онлайн)
Fig. 3. Modeled structures: a – triangles without film; b – triangles with film (color online)

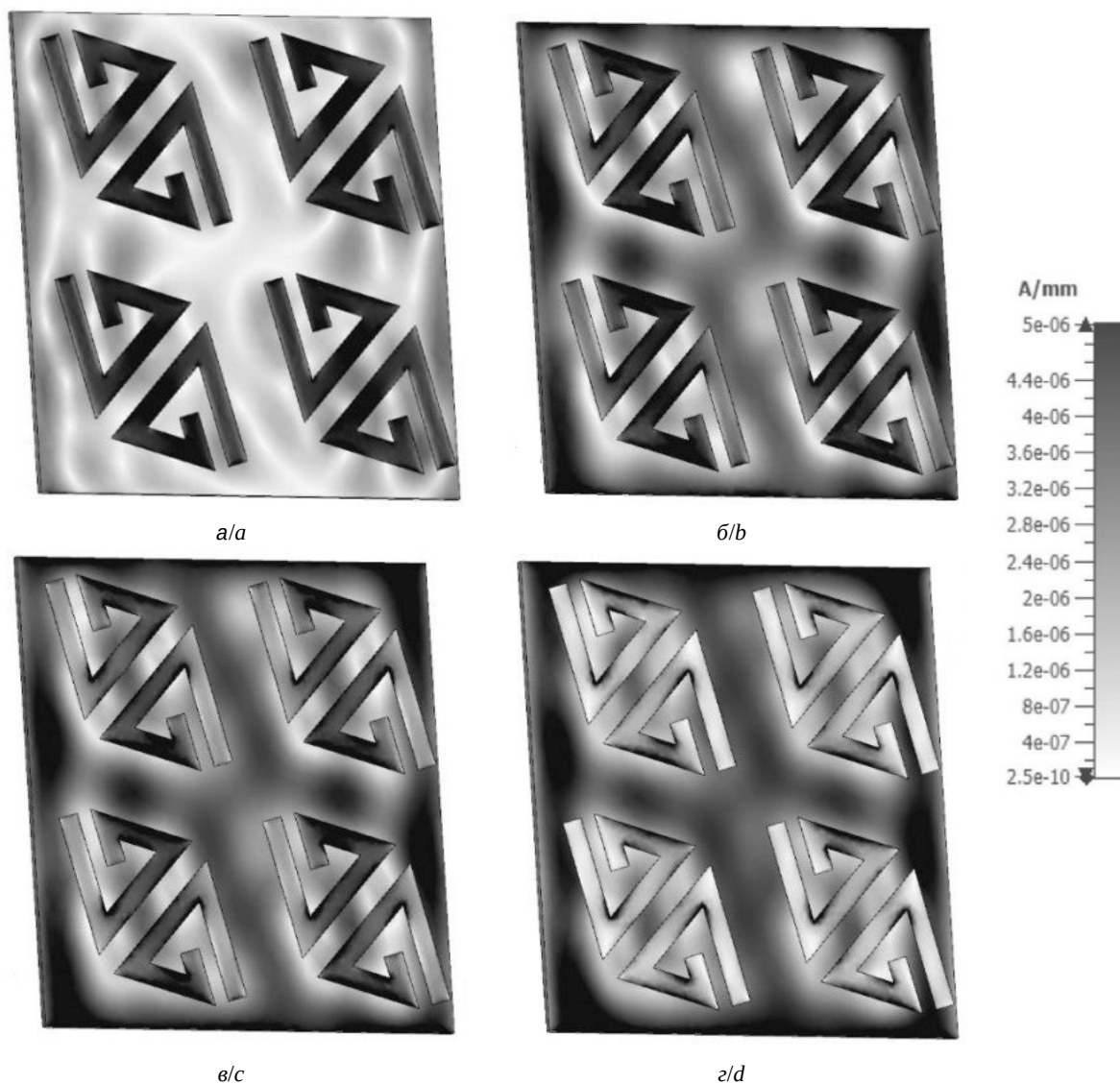


Рис. 4. Распределение пространственных токов на поверхности метаструктуры в разных фазах на частоте 19 ГГц:
 $a - 0^\circ$, $б - 45^\circ$, $в - 60^\circ$, $г - 90^\circ$

Fig. 4. Distribution of spatial currents on the metasurface surface in different phases at the frequency of 19 GHz:
 $a - 0^\circ$, $b - 45^\circ$, $c - 60^\circ$, $d - 90^\circ$

ку в более высокочастотную область, при этом незначительно изменяя форму пиков.

Наилучшего ослабления отраженной от структуры волны нам удалось достичь при добавлении поглощающего слоя состоящего из пленок алюминия средней толщиной 5 нм. Поскольку на таких размерах вследствие механизмов роста плёнки про толщину можно говорить лишь условно, она аппроксимируется исходя из времени напыления материала. Ниже представлено сравнение экспериментальных и модельных результатов именно для этих комбинаций. Для определения эффективности рассеяния были рассчитаны частотные

характеристики ослабления комбинированной поверхности, приведенные на рис. 5.

Полученные результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований в достаточной степени коррелируют между собой и показывают, что комбинированные поверхности подобного типа имеют достаточно большие значения по ослаблению отраженной волны. Частотная зависимость представленной структуры обладает явно выраженными пиками. Исходя из графика, полученного путем компьютерного моделирования, основная резонансная частота находится на частоте 18.4 ГГц. На этой частоте коэффициент ослабления достигает своего

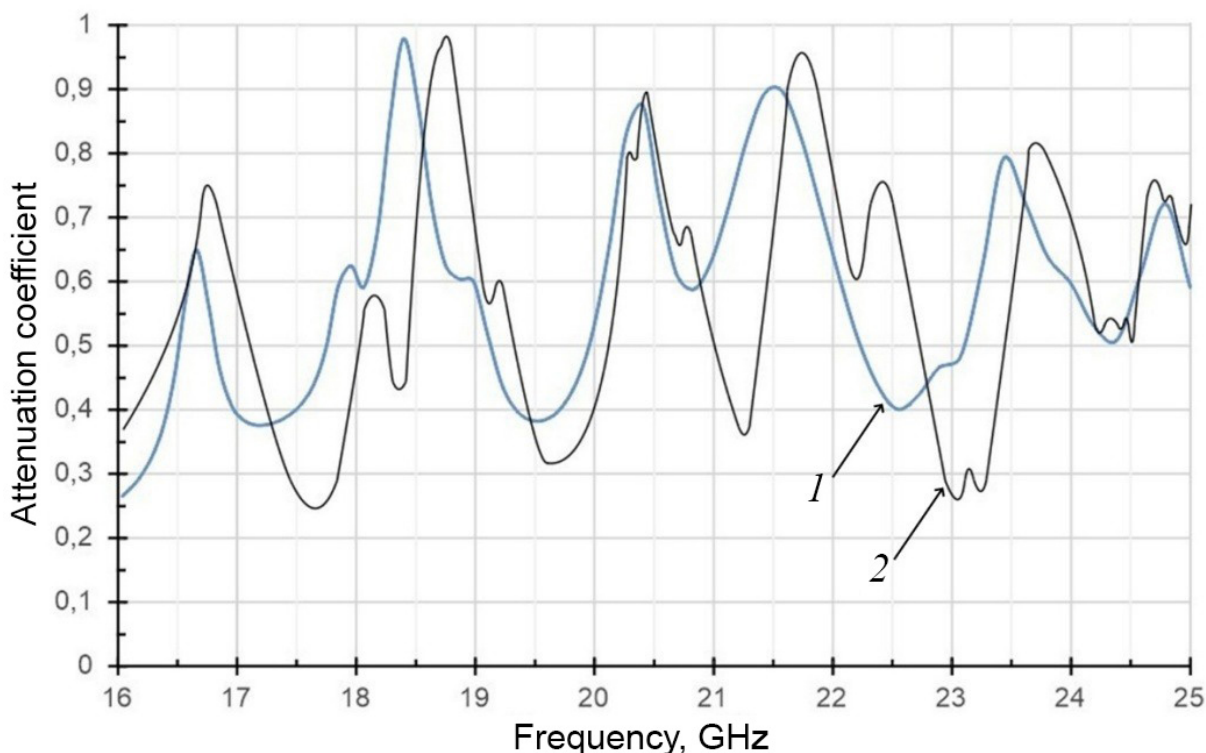


Рис. 5. Частотная характеристика коэффициента ослабления комбинированного покрытия: моделирование (1), эксперимент (2) (цвет онлайн)

Fig. 5. Frequency characteristic of the attenuation coefficient of the combined coating: model (1), experimental (2) (color online)

пикового значения – 97.8% от падающей волны, а ширина резонансного пика, на которой ослабление волны достигает не менее 70%, составляет 450 МГц. Частотная зависимость, полученная экспериментально, также имеет схожий характер, однако максимум резонанса сдвинут в более высокочастотную область. Остальные пики также демонстрируют подобную характеристику, что является следствием различных пространственных связей между метаструктурами и тонкими пленками алюминия, которые не учитываются в модели, или же не идеальностью эксперимента и полученных образцов. Однако в обоих случаях даже побочные пики обладают весьма значительными показателями ослабления.

Результат компьютерного моделирования рассеяния представлен на рис. 6. Для рассмотрения влияния частоты падающей волны на величину ослабления отраженной от структуры волны выбирались три характерные частоты на участке спада резонансного пика: 18.4 ГГц, 19 ГГц и 19.6 ГГц. Из полученных диаграмм можно сделать вывод, что при приближении частоты падающего излучения к резонансной, величина

основного лепестка отраженной волны уменьшается. Также можно увидеть, что при увеличении частоты появляются все более явно выраженные боковые лепестки, величина и ширина которых варьируется в зависимости от частоты. Так, для резонансной частоты ширина бокового лепестка составляет лишь 15° , а его величина не превышает 10% от основного лепестка (рис. 6, вставка). Однако для более высоких характерных частот (с меньшим значением коэффициента ослабления) боковые лепестки начинают возрастать, и становиться шире, достигая значения ширины лепестка равным 32° за счет формирования второго бокового лепестка, вследствие чего показатель ослабления значительно падает.

Далее рассмотрим экспериментально полученные данные диаграмм рассеяния на тех же частотах по такому же принципу, выбирая три характерные точки на прямой линии спада коэффициента ослабления (рис. 7). Экспериментальные данные получены с использованием бистатистического метода измерения, описанного во первом разделе статьи.

На графике можно увидеть, что модель имеет те же характерные особенности, что и реаль-

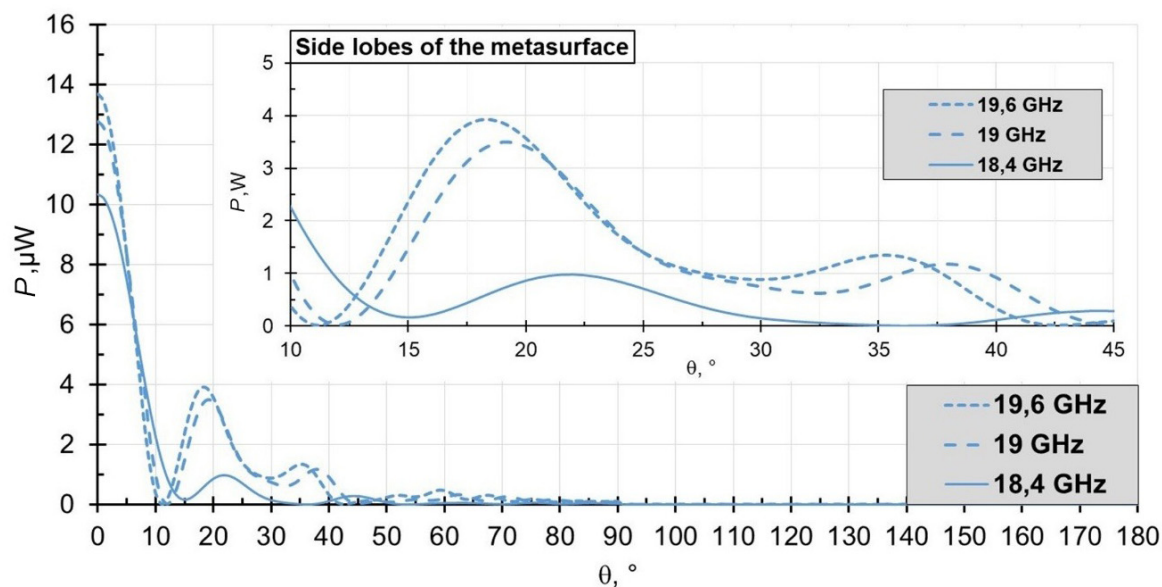


Рис. 6. Диаграммы рассеяния комбинированного покрытия на характерных частотах (на вставке – для диапазона углов 10–45°) (цвет онлайн)

Fig. 6. Scattering diagrams of the combined coating at characteristic frequencies (in the inset – for the angle range of 10–45°) (color online)

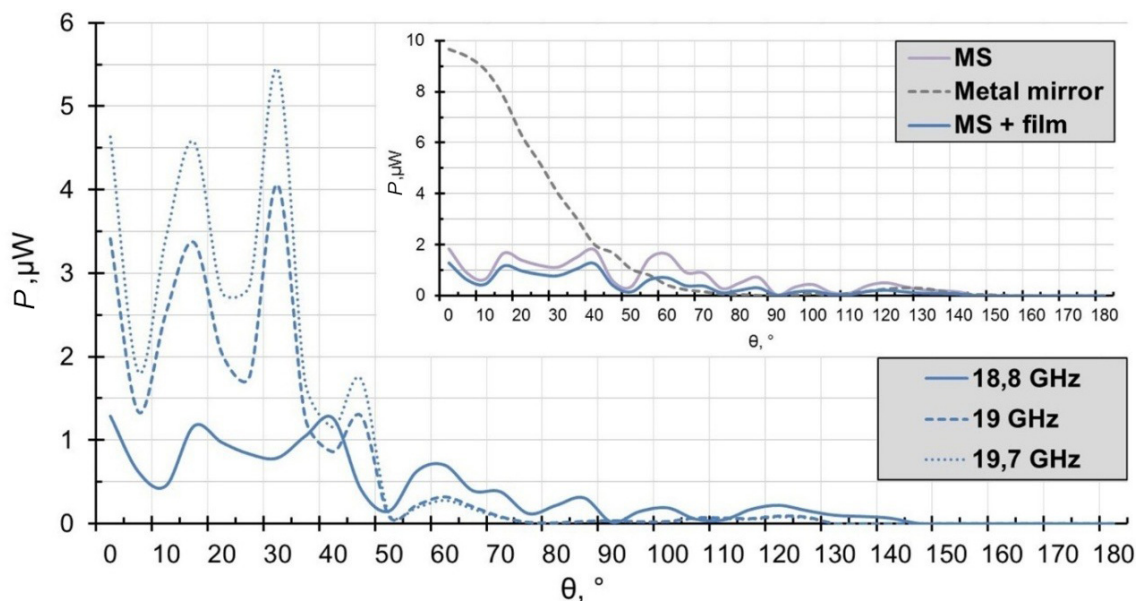


Рис. 7. Экспериментальные диаграммы рассеяния комбинированного покрытия на характерных частотах. На вставке – диаграммы рассеяния зеркала, метаструктуры (MS) и метаструктуры с поглощающим слоем (цвет онлайн)

Fig. 7. Experimental scattering diagrams of the combined coating at characteristic frequencies. The inset shows the scattering diagrams of the mirror, the metastructure (MS) and the metastructure with an absorbing layer (color online)

ные образцы, а именно: значительное ослабление основного лепестка отраженной волны; наличие меняющихся в зависимости от частоты боковых лепестков с зависимостями, полученными в ходе компьютерного моделирования, схожими с теми, что были получены при моделировании; схожий характер спада кривой. Видно, что

величина основного лепестка отраженной волны увеличивается пропорционально отдалению от резонансной частоты, вместе с величиной боковых лепестков.

Наличие излучения в промежутке от 90° до 140° в экспериментальных результатах объясняется различного рода погрешностями в ходе



эксперимента, а также наличием дифракционных явлений, что приводит к их накоплению. Это отражают диаграммы на вставке на рис. 7, где представлена сравнительная характеристика рассеивания исследуемых образцов и металлического зеркала, полученная на одной частоте.

Заключение

В работе исследованы электродинамические характеристики комбинированных металлоди-электрических поверхностей. В процессе тестирования множества комбинаций материалов и различных симметрий расположения резонаторов на поверхности метаструктур наилучшие показатели достигнуты на метаструктурах и нанометровых алюминиевых слоях толщиной 5 нм. Именно при использовании комбинации этих материалов удалось снизить нормальную составляющую отраженной волны на 75% относительно металлического зеркала. При этом добавление резистивной наноразмерной пленки поверх спиралевидных резонаторов позволило дополнительно ослабить отраженную волну до 90%. При этом следует отметить, что добавление резистивной пленки обладает свойством сдвигать резонансные пики в более высокочастотную область, вследствие образования дополнительной емкости между резонаторами метаструктуры и нанометровым слоем проводящей пленки. Величина частотного сдвига составляла порядка 500 МГц.

Список литературы

1. Salahdine F., Han T., Zhang N. 5G, 6G, and Beyond: Recent advances and future challenges // *Ann. Telecommun.* 2023. Vol. 78, iss. 9–10. P. 525–549. <https://doi.org/10.1007/s12243-022-00938-3>
2. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: санитарные правила и нормы: утв. 28.01.2021. М. : Б. и., 2022. 469 с.
3. Денисенко В. Беспроводные локальные сети // *Современные технологии автоматизации.* 2009. № 1. С. 90–102.
4. Chen T., Tang W., Mu J., Cui T. J. Microwave Metamaterials // *Annalen der Physik.* 2019. Vol. 531, iss. 8. Art. 1800445. <https://doi.org/10.1002/andp.201800445>
5. Van Schelven R. M., Bernardis A. F., Sberna P., Neto A. Drude Dispersion in the Transmission Line Modeling of Bulk Absorbers at Sub-mm Wave Frequencies: A tool for absorber optimization // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* 2022. Vol. 64, iss. 1. P. 50–60. <https://doi.org/10.1109/MAP.2021.3073092>
6. El Assal A., Breiss H., Benzerger R., Sharaiha A., Jrad A., Harmouch A. Toward an Ultra-Wideband Hybrid Metamaterial Based Microwave Absorber // *Micromachines.* 2020. Vol. 11, iss. 10. Art. 930. <https://doi.org/10.3390/mi11100930>
7. Li Z., Yang R., Wang J., Zhao Y., Tian J., Zhang W. Multifunctional metasurface for broadband absorption, linear and circular polarization conversions // *Optical Materials Express.* 2021. Vol. 11, iss. 10. P. 3507–3519. <https://doi.org/10.1364/OME.437474>
8. Huang C., Pan W., Ma X., Luo X. Multi-spectral Metasurface for Different Functional Control of Reflection Waves // *Scientific Reports.* 2016. Vol. 6, iss. 1. Art. 23291. <https://doi.org/10.1038/srep23291>
9. Semenikhina D. V., Chikov N. I., Semenikhin A. I., Gorbatenko N. N. Experimental studies of nonlinear metasurface with metamaterial substrate // *24th Telecommunications Forum (TELFOR).* Belgrade, Serbia : IEEE, 2016. Art. 7818846. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2016.7818846>
10. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V., Ilyin I. V. Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers // *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2021. Vol. 24, № 4. P. 57–67. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67>
11. Gusev A. N., Mazinov A. S., Shevchenko A. I., Tyutyunik A. S., Gurchenko V. S., Braga E. V. The Voltage-Current Characteristics and Photoelectric Effect of Fullerene C60–N–Isoamylisatin 4-Methylphenylhydrazon Heterostructures // *Technical Physics Letters.* 2019. Vol. 45, iss. 10. P. 997–1000. <https://doi.org/10.1134/S1063785019100080>
12. Sorathiya V., Lavadiya S., Parmar B., Das S., Krishna M., Faragallah O. S., Baz M., Eid M. M. A., Rashed A. N. Z. Numerical investigation of the tunable polarizer using gold array and graphene metamaterial structure for an infrared frequency range // *Applied Physics B.* 2022. Vol. 128, iss. 1. Art. 13. <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07731-5>
13. Yang L.-J., Li J.-S., Li X.-J. Transmission/reflection/absorption individually control multifunctional metasurfaces // *Optical Materials Express.* 2022. Vol. 12, iss. 4. P. 1386–1396. <https://doi.org/10.1364/OME.454456>
14. Мазинов А. С., Падалинский М. М., Болдырев Н. А., Старосек А. В. Моделирование рассеивающих свойств блочных метаповерхностей в диапазоне 16–25 ГГц и сравнение с экспериментальными результатами // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика.* 2023. Т. 23, вып. 2. С. 102–111. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-102-111>, EDN: SXWPVG
15. Mazinov A., Boldyrev N., Padalinsky M., Starosek A. Investigation of the Attenuation Properties of a Compact Absorber Based on a Metamaterial and a Nanometer Conductive Film // *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW).* Divnomorskoe, Russian Federation : IEEE, 2023. P. 304–307. <https://doi.org/10.1109/RSEMW58451.2023.10202152>



16. Мазин А. С. Физические и электродинамические свойства наноразмерных проводящих пленок на полимерных подложках // Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии. 2020. Т. 12, № 2. С. 247–252. <https://doi.org/10.17725/rensit.2020.12.247>
17. Юрцев О. А., Бобков Ю. Ю., Кизименко В. В., Юбко А. П., Герасимович Г. В. Моделирование антенн в режимах излучения и рассеяния в пакетах CST STUDIO, HFSS, FEKO и узкоспециализированных программах : методическое пособие по дисциплинам «Антенны и устройства СВЧ», «Методы и устройства формирования информационных электромагнитных полей», «Распространение радиоволн в антенно-фидерных устройствах», «Техника СВЧ и КВЧ в медицинских приборах». Минск : БГУИР, 2012. 62 с.
18. Алексейчик Л. В., Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. М. : Солон-Пресс, 2022. 276 с.
19. Мазин А. С., Болдырев Н. А., Падалинский М. М. Частотные характеристики спиралевидной треугольной метаповерхности и ее влияние на ослабление падающей волны // Радиолокация, навигация, связь: сб. трудов XXX Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 16–18 апреля 2024 г.) : в 5 т. Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2024. Т. 4. С. 327–330.
20. Болдырев Н. А., Фитаев И. Ш., Падалинский М. М., Полетаев Д. А., Мазин А. С. Возможности ослабления основного лепестка отраженной волны посредством спиралевидной треугольной метаструктуры // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20, № 2. С. 116–123. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2024.20.2.018>, EDN: BKLSXZ
- for absorber optimization. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2022, vol. 64, iss. 1, pp. 50–60. <https://doi.org/10.1109/MAP.2021.3073092>
6. El Assal A., Breiss H., Benzergha R., Sharaiha A., Jrad A., Harmouch A. Toward an Ultra-Wideband Hybrid Metamaterial Based Microwave Absorber. *Micromachines*, 2020, vol. 11, iss. 10, art. 930. <https://doi.org/10.3390/mi11100930>
7. Li Z., Yang R., Wang J., Zhao Y., Tian J., Zhang W. Multifunctional metasurface for broadband absorption, linear and circular polarization conversions. *Optical Materials Express*, 2021, vol. 11, iss. 10, pp. 3507–3519. <https://doi.org/10.1364/OME.437474>
8. Huang C., Pan W., Ma X., Luo X. Multi-spectral Metasurface for Different Functional Control of Reflection Waves. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, iss. 1, art. 23291. <https://doi.org/10.1038/srep23291>
9. Semenikhina D. V., Chikov N. I., Semenikhin A. I., Gorbatenko N. N. Experimental studies of nonlinear metasurface with metamaterial substrate. *24th Telecommunications Forum (TELFOR)*. Belgrade, Serbia, IEEE, 2016, art. 7818846. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2016.7818846>
10. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V., Ilyin I. V. Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 57–67. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67>
11. Gusev A. N., Mazinov A. S., Shevchenko A. I., Tyutyunik A. S., Gurchenko V. S., Braga E. V. The Voltage-Current Characteristics and Photoelectric Effect of Fullerene C60–N-Isoamylisatin 4-Methylphenylhydrazones Heterostructures. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, iss. 10, pp. 997–1000. <https://doi.org/10.1134/S1063785019100080>
12. Sorathiya V., Lavadiya S., Parmar B., Das S., Krishna M., Faragallah O. S., Baz M., Eid M. M. A., Rashed A. N. Z. Numerical investigation of the tunable polarizer using gold array and graphene metamaterial structure for an infrared frequency range. *Applied Physics B*, 2022, vol. 128, iss. 1, art. 13. <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07731-5>
13. Yang L.-J., Li J.-S., Li X.-J. Transmission/reflection/absorption individually control multifunctional metasurfaces. *Optical Materials Express*, 2022, vol. 12, iss. 4, pp. 1386–1396. <https://doi.org/10.1364/OME.454456>
14. Mazinov A. S., Padalinsky M. M., Boldyrev N. A., Starosek A. V. Simulation of scattering properties of modular metasurfaces in the 16–25 GHz range and comparison with experimental results. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 102–111 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-102-111>
15. Mazinov A., Boldyrev N., Padalinsky M., Starosek A. Investigation of the Attenuation Properties of a Compact Absorber Based on a Metamaterial and a Nanometer Conductive Film. *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. Divnomorskoe, Russian

References



- Federation, IEEE, 2023, pp. 304–307. <https://doi.org/10.1109/RSEMW58451.2023.10202152>
16. Mazinov A. S. Physical and electrodynamic properties of nanoscale conductive films on polymer substrates. *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2020, vol. 12, iss. 2, pp. 247–252. <https://doi.org/10.17725/rensit.2020.12.247>
17. Yurzev O. A., Bobkov Yu. Yu., Kizimento V. V., Yubko A. P., Gerasimovitch G. V. *Modelirovanie anten v rezhimakh izlucheniya i rassejaniya v paketakh CST STUDIO, HFSS, FEKO i uzkospetsializirovannykh programmakh: metodicheskoe posobie po disciplinam "Antennы i ustrojstva SVCh", "Metody i ustrojstva formirovaniya informacionnykh jelektromagnitnykh polej", "Rasprostraneniye radiovoln v antenno-fidernykh ustrojstvakh", "Tekhnika SVCh i KVCh v meditsinskikh priborakh"* [Modelling of antennas in radiation and scattering modes in CST STUDIO, HFSS, FEKO and highly specialised software packages: Methodical manual on courses "Antennas and microwave devices", "Methods and devices for the formation of information electromagnetic fields", "Propagation of radio waves in antenna-feeder devices", "Microwave and EHF techniques in medical devices"]. Minsk, BSUIR Publ., 2012. 62 p. (in Russian).
18. Alekseychik L. V., Kurushin A. A. *Proektirovanie SVCh ustroystv v CST STUDIO SUITE* [Designing microwave devices in CST STUDIO SUITE]. Moscow, Solon-Press, 2022. 276 p. (in Russian).
19. Mazinov A. S., Boldyrev N. A., Padalinskiy M. M. Frequency characteristics of spiral triangular metasurface and its influence on attenuation of the incident wave. *Radar, Navigation, Communications: Collected papers of the XXX International scientific and technical conference (Voronezh, April 16–18, 2024), in 5 volumes*. Voronezh, VSU Publ., 2024, vol. 4, pp. 327–330 (in Russian).
20. Boldyrev N. A., Fitaev I. Sh., Padalinsky M. M., Poletaev D. A., Mazinov A. S. The possibility of attenuation of the main lobe of the reflected wave by means of a spiral triangular metastructure. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 116–123. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2024.20.2.018> (in Russian).

Поступила в редакцию 27.11.2024; одобрена после рецензирования 09.01.2025; принята к публикации 16.01.2025; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 27.11.2024; approved after reviewing 09.01.2025; accepted for publication 16.01.2025; published 31.03.2025



ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 24–36
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1. P. 24–36
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-24-36>, EDN: GCAGDK

Научная статья
УДК 539.194

ИК спектры и структурно-динамические ангармонические модели циклогексанола

Л. М. Бабков

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Бабков Лев Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры инноватики, imbabkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3403-3786>, AuthorID: 44780

Аннотация. Методом теории функционала плотности B3LYP/6-31G(d) с учетом механического ангармонизма построены структурно-динамические модели двух конформеров молекулы циклогексанола 1 и 2 с экваториальной ориентацией гидроксильной группы. Вычислены необходимые параметры адиабатических потенциалов конформеров: минимумы энергий, оптимальные геометрии, дипольные моменты, силовые постоянные, рассчитаны частоты и формы нормальных колебаний и их интенсивности в ИК спектрах. Дана оценка полученных результатов на основании сравнения их с рассчитанными ранее в гармоническом приближении. Поведен анализ измеренных в области $400\text{--}3800\text{ см}^{-1}$ ИК спектров образцов циклогексанола в кристаллических фазах II и III с целью выявления обертонов, составных колебаний и резонансов. Уточнена интерпретация измеренных ИК спектров.

Ключевые слова: циклогексанол, молекула, конформер, молекулярное моделирование, метод функционала плотности, механический ангармонизм, ИК спектр, нормальное колебание, составная частота, обертон, резонанс

Для цитирования: Бабков Л. М. ИК спектры и структурно-динамические ангармонические модели циклогексанола // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 24–36. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-24-36>, EDN: GCAGDK

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

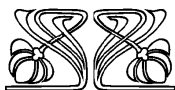
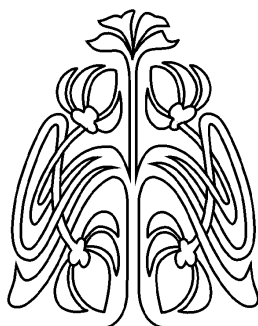
IR spectra and structural-dynamic anharmonic models of cyclohexanol

L. M. Babkov

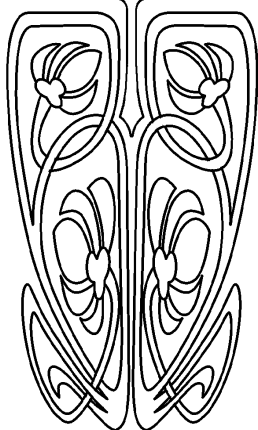
Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Lev M. Babkov, imbabkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3403-3786>, AuthorID: 44780

Abstract. Background and Objectives: The construction of quantum mechanical structural-dynamic models of molecular systems has become a necessary part of studies of the structure, optical spectra and properties of matter. The results obtained in the harmonic approximation followed by a scaling procedure guarantee a reliable interpretation of the fundamental vibration bands of the measured vibrational spectra. However, if the spectrum has a complex structure determined by fundamental vibrations, overtones, composite frequencies, resonances, the interpretation is not complete. An approach based on taking into account mechanical anharmonicity makes it possible to significantly minimize the discrepancy between calculated and measured frequencies of fundamental vibrations, identify overtones and composite frequencies in the measured spectra,



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





and establish the presence of resonant interactions. The advantage of this approach manifests itself to varying degrees in specific cases. In this article, using the density functional theory method, taking into account mechanical anharmonicity, structural-dynamic models of two conformers of the cyclohexanol molecule are constructed. The goal is to identify in this particular case the advantages of taking anharmonicity into account, which consists in minimizing the discrepancies between calculated and measured frequencies, identifying overtones, composite frequencies and resonances, refining and replenishing the interpretation of the measured spectra. **Materials and Methods:** Cyclohexanol ($C_6H_{11}OH$), used in many industries, has been the subject of extensive scientific research. The IR spectra of samples of crystalline phases II and III of cyclohexanol were used, measured on a Bruker IFS-88 Fourier spectrometer at a temperature of 12 K. Using the B3LYP/6-31G(d) method using the GAUSSIAN'03 software package, structural-dynamic models of conformers 1 and 2 isolated cyclohexanol molecules with an equatorial orientation of the hydroxyl group relative to the carbon backbone of the molecule. **Results:** The main parameters of adiabatic potentials have been calculated: minimum energies, optimal geometries, dipole moments of conformers 1 and 2 of an isolated cyclohexanol molecule. The frequencies of normal vibrations in the anharmonic approximation and the intensities of fundamental bands in the IR spectra have been calculated. A vibrational analysis of the IR spectra of cyclohexanol samples in crystalline phases II and III, measured in the range $400\text{--}3800\text{ cm}^{-1}$, has been carried out in order to identify overtones, vibrations of compounds and resonances. An assessment of the results obtained in comparison with those obtained in the harmonic approximation has been given. Their interpretation of the measured IR spectra has been refined. **Conclusions:** Based on the results of taking into account mechanical anharmonicity when constructing structural-dynamic models of isolated conformers 1 and 2 of cyclohexanol, it has been established that the agreement between the measured and calculated frequencies in the regions of $1080\text{--}1550\text{ cm}^{-1}$ and $2800\text{--}2940\text{ cm}^{-1}$ of the IR spectrum has significantly improved compared to harmonic scaled frequencies. The consequence of this improvement is a refinement of the interpretation of the frequencies ν_{40} and ν_{41} of the stretching vibrations of the C–H bonds closest to the core of the H-complex, and the band with a maximum at a frequency of 1517 cm^{-1} in the spectrum of crystalline phase II, which is a superposition of the composite vibrations $\nu_8 + \nu_{18}$, $\nu_5 + \nu_{23}$, $\nu_9 + \nu_{16}$. It has been established that resonance interactions in cyclohexanol conformers are small and resonances are unlikely. This conclusion is consistent with experimental data on the IR spectra of cyclohexanol.

Keywords: cyclohexanol, IR spectrum, density functional method, molecular modeling, mechanical anharmonicity, normal fluctuation, composite frequency, overtone

For citation: Babkov L. M. IR spectra and structural-dynamic anharmonic models of cyclohexanol. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 24–36 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-24-36>, EDN: GCAGDK

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Построение структурно-динамических моделей молекулярных систем, образующих вещество в различных фазовых состояниях, на основе квантово-механических методов стало необходимой частью исследований его структуры, оптических спектров и свойств. Критерием правильности выбора метода и приближений является хорошее согласие вычисленных и измеренных спектроскопических параметров. Расхождение рассчитанных в рамках метода теории функционала плотности (ТФП) в гармоническом приближении частот нормальных колебаний с измеренными не превышает 4–5%, что обеспечило широкое использование результатов таких расчетов в исследованиях структуры, спектров и свойств вещества. Абсолютная ошибка в пределах указанной погрешности неодинакова для различных областей колебательного спектра. В высокочастотной области ($2850\text{--}3750\text{ cm}^{-1}$), где проявляются валентные колебания связей C–H, N–H, O–H она находится в диапазоне $150\text{--}200\text{ cm}^{-1}$. Для частот среднего диапазона ($400\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$) абсолютная ошибка на порядок меньше и сопоставима с ошибками метода валентно-силового поля, широко использовавшегося в теории колебательных спектров молекул [1–4] до внедрения в молекулярное моделирование метода ТФП. Для минимизации

указанной ошибки в мировой практике широко используется процедура масштабирования силовых полей и частот [5–7]. Получаемые при этом результаты гарантируют надежную интерпретацию частот фундаментальных колебаний измеренных наблюдавшихся спектров молекулярных систем. Однако при наличии у спектра сложной структуры, определяемой фундаментальными колебаниями, обертонами, составными частотами, резонансами, интерпретация не является полной, и это не может удовлетворить исследователя.

Подход, основанный на учете механического ангармонизма, позволяет в значительной степени минимизировать расхождение рассчитанных и измеренных частот фундаментальных колебаний, выявить в измеренных спектрах обертоны и составные частоты, установить наличие резонансных взаимодействий. Преимущество этого подхода проявляется в конкретных случаях в различной степени. Как показала практика, его реализация требует значительно большего временного ресурса, что стало одной из причин его ограниченного использования. Он применим при построении структурно-динамических моделей не слишком громоздких молекулярных систем: свободных молекул (бензол [8], азациклические соединения [9], 2-бифенилметанол [10]), простейших комплек-



сов с водородной связью [11] и т. д. В этих случаях учет ангармонизма демонстрирует ряд неоспоримых преимуществ.

В настоящей работе представлены результаты расчета ИК спектров двух конформеров циклогексанола в ангармоническом приближении с использованием основных параметров их адиабатических потенциалов, вычисленных методом ТФП. Цель – выявление в данном конкретном случае преимуществ учета ангармонизма, состоящих в минимизации расхождений рассчитанных и измеренных частот, выявлении составных частот, обертонов и резонансов, в уточнении и пополнении интерпретации измеренных спектров.

Циклогексанол ($C_6H_{11}OH$), используемый во многих отраслях промышленности, является объектом всесторонних научных исследований [12–22]. Его молекула обладает конформационной мобильностью [16–19] и реализуется в виде четырех конформеров, различающихся ориентацией гидроксильной группы [19]. Конформеры обозначаются арабскими цифрами (рис. 1). Методом рентгеноструктурного анализа и нейтронографии установлено, что циклогексанол обладает полиморфизмом [19] и образует нескольких стабильных при определенных внешних условиях кристаллических структур с различным конформационным составом молекул. Они обозначаются римскими цифрами.

Структуры полиморфных модификаций в значительной степени обусловлены влиянием водородной связи [17, 18, 22]. Установлено, что циклогексанол образует пластическую фазу I.

Одна из его кристаллических фаз (II) представлена циклическими тетрамерами, другая (III) – бесконечными цепочками из димеров, а нестабильная фаза (III') – тримерами. Н-комплексы состоят из конформеров циклогексанола 1 и 2 (см. рис. 1) с экваториальной ориентацией гидроксильной группы. В работах [20, 21] проведено моделирование структуры и спектров четырех возможных конформеров циклогексанола в гармоническом приближении, установлены их спектрально-структурные признаки. В работе [22] исследовано влияние водородной связи на структуру и колебательные спектры циклогексанола. интерпретированы измеренные ИК спектры. Расчеты в [22] базировались на экспериментальных данных работы [19], в соответствии с которыми кристаллическая фаза II представлена Н-комплексами конформера 1, кристаллическая фаза III – Н-комплексами конформеров 1 и 2. Предложенную в [21, 22] интерпретацию измеренных ИК спектров кристаллических фаз II, III нельзя, как нам показалось, считать полной, в связи с чем возникла идея учета ангармонизма при построении структурно-динамических моделей конформеров циклогексанола 1 и 2.

1. Эксперимент и моделирование

Экспериментальная часть работы подробно описана в [21, 22]. Здесь мы кратко остановимся на моментах, имеющих непосредственное отношение к рассматриваемой проблеме. В работе использованы ИК спектры образцов кристаллических фаз II, III циклогексанола, измеренные

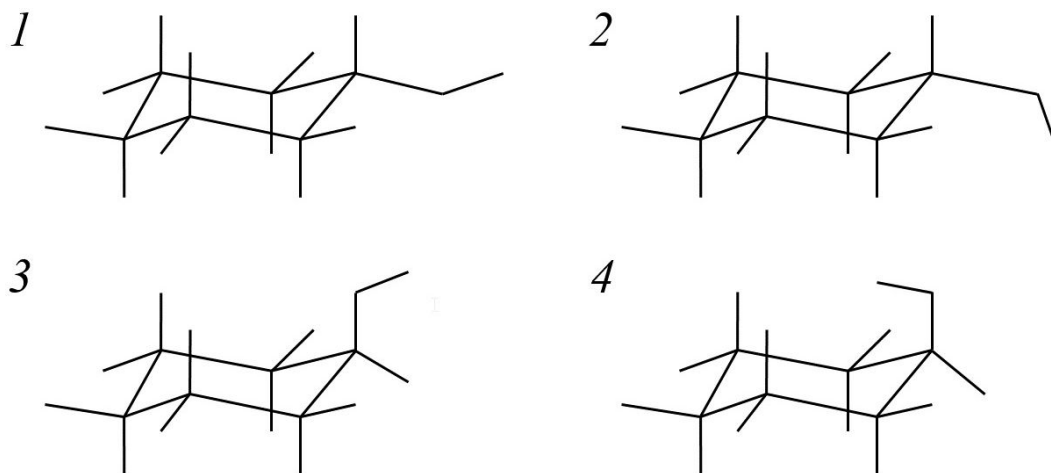


Рис. 1. Конформеры 1–4 молекулы циклогексанола [19]

Fig. 1. Conformers 1–4 of a cyclohexanol molecule [19]



на Фурье-спектрометре IFS-88 (Bruker, Германия) при температуре 12 К.

Методом ТФП B3LYP/6-31G(d), с использованием программного комплекса GAUSSIAN'03 [23–25], построены структурно-динамические модели конформеров 1 и 2 изолированной молекулы циклогексанола с экваториальной ориентацией гидроксильной группы относительно углеродного остова молекулы. Вычислены основные параметры адиабатических потенциалов: минимальные энергии, оптимальные геометрии, дипольные моменты. Рассчитаны частоты нормальных колебаний в ангармоническом приближении, интенсивности фундаментальных полос в ИК спектрах, проведен колебательный анализ спектров с целью выявления частот первых обертонов, составных частот, резонансов.

2. Результаты и их обсуждение

Строение конформеров 1 и 2 циклогексанола представлено на рис. 2. Рассчитанные значения энергии, дипольных моментов (μ_0) и геометрические параметры конформеров приведены в табл. 1. Неплоские циклогексановые кольца конформеров имеют конформацию «кресло». Положения гидроксильной группы относительно остова молекулы различаются величиной двугранного угла $H_8-O_7-C_1-H_9$: 60° для конформера 1 и 180° для конформера 2.

В табл. 2 приведены частоты нормальных колебаний конформеров 1 и 2, рассчитанные в гармоническом приближении (не масштабированные и масштабированные) и ангармоническом, их интенсивности в ИК спектрах, дано отнесение частот по коэффициентам форм нормальных колебаний.

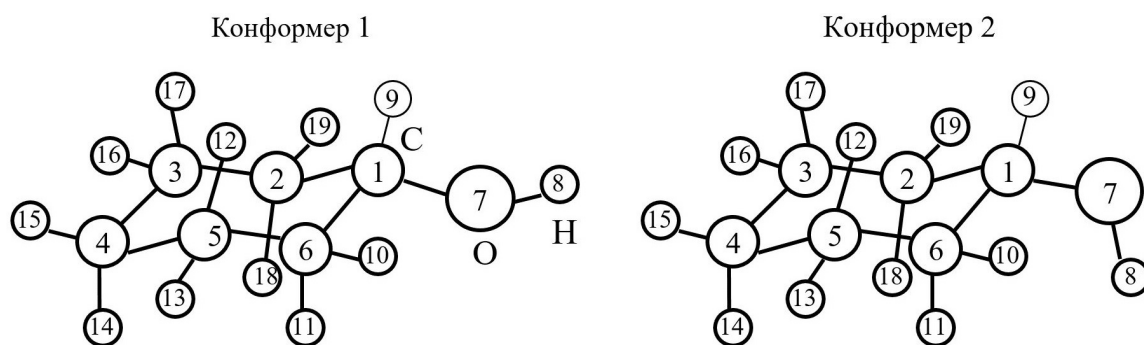


Рис. 2. Строение конформеров молекулы циклогексанола

Fig. 2. Structure of conformers of the cyclohexanol molecule

Таблица 1 / Table 1

Рассчитанные параметры конформеров молекулы циклогексанола [21]

Calculated parameters of conformers of the cyclohexanol molecule [21]

Параметры		Конформер / Conformer	
		1	2
Энергия / Energy, Eh	E	–311.090870	–311.091238
Дип. момент / Dip. moment, D	μ_0	1.71	1.91
Длины связей / Bond lengths, Å	$O_7 - H_8$	0.97	0.97
	$C_1 - O_7$	1.43	1.43
	$C_1 - C_2$	1.53	1.53
	$C_1 - C_6$	1.53	1.53
Углы, град. / Angles, degrees	$C_1-O_7-H_8$	108	107
	$H_9-C_1-O_7$	110	104
	$C_6-C_1-O_7$	112	112
	$C_1-C_2-C_3$	112	112
	$C_2-C_1-C_6$	111	111
Двугранные углы, град. / Dihedral Angles, degrees	$H_8-O_7-C_1-H_9$	64	180
	$C_4-C_5-C_6-C_1$	55	55



Таблица 2 / Table 2

Измеренные и рассчитанные частоты нормальных колебаний конформеров 1 и 2 молекулы циклогексанола
Measured and calculated frequencies of normal vibrations of conformers 1 and 2 of the cyclohexanol molecule

№ колебания / Vibration, no.	Эксперимент / Experiment		Конформер 1 / Conformer 1				Конформер 2 / Conformer 2				Отнесение* / Assignment
	ν_{II} , cm^{-1}	ν_{III} , cm^{-1}	ν_{harm} , cm^{-1} [21]	ν_{scaled} , cm^{-1} [21]	ν_{anham} , cm^{-1} [21]	I_{IR} , km/mole [21]	ν_{harm} , cm^{-1} [21]	ν_{scaled} , cm^{-1} [21]	ν_{anham} , cm^{-1} [21]	I_{IR} , km/mole [21]	
1			161	159	159	0.9	163	161	151	1.8	$\chi(\text{C}_5\text{C}_6\text{C}_1\text{O}_7)$, $\chi(\text{O}_7\text{C}_1\text{C}_2\text{C}_3)$, $\chi(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{C}_1\text{O}_7)$, $\chi(\text{C}_3\text{C}_2\text{C}_1\text{H}_9)$
2			230	227	214	1.4	229	226	193	4.7	$\chi(\text{C}_1\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{17})$, $\chi(\text{H}_{12}\text{C}_5\text{C}_6\text{C}_1)$, $\chi(\text{C}_4\text{C}_3\text{C}_2\text{C}_1)$,
3			299	295	334	107.8	297	293	148	65.7	$\chi(\text{C}_2\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8)$, $\chi(\text{C}_6\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8)$, $\chi(\text{H}_9\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8)$
4			334	329	321	2.1	333	328	317	1.9	$\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{14})$, $\chi(\text{H}_{14}\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{12})$, $\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{C}_5)$
5			344	339	342	14.2	363	358	322	46.1	$\chi(\text{C}_2\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8)$, $\chi(\text{C}_6\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8)$, $\chi(\text{H}_9\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8)$
6	409	411	406	400	407	0.4	405	399	408	0.6	$\chi(\text{H}_{19}\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{16})$, $\chi(\text{H}_{10}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13})$, $\chi(\text{H}_{10}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{12})$
7	451	447	456	449	448	1.5	454	447	442	2.7	$\chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{H}_{15}\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{13})$, $\chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{14})$
8	461	463	476	469	467	5.4	469	462	459	1.6	$\chi(\text{H}_{10}\text{C}_6\text{C}_1\text{C}_2)$, $\chi(\text{C}_6\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{19})$, $\chi(\text{C}_6\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{18})$
9	551	552	558	550	545	5.4	557	549	540	1.3	$\chi(\text{C}_2\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{C}_6\text{C}_5\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{C}_1\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13})$
10	789	790	799	787	786	0.8	795	783	781	2.7	$\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_2\text{H}_{18})$, $\chi(\text{H}_{11}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{12})$, $\chi(\text{H}_{11}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13})$
11	789	790	802	790	791	0.6	800	788	787	0.3	$\chi(\text{C}_2\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{C}_6\text{C}_5\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{C}_1\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13})$
12	845	847	855	842	839	1.5	853	840	836	1.7	$Q(\text{C}_3\text{C}_4)$, $Q(\text{C}_4\text{C}_5)$, $\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{14})$, $\chi(\text{H}_{14}\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{12})$
13	889	891	901	887	886	6.3	898	885	878	1.5	$\chi(\text{H}_{15}\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{12})$, $\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{H}_{15}\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{13})$
14	889	891	904	890	892	6.3	905	891	891	6.8	$\chi(\text{H}_{11}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{12})$, $\chi(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{17})$, $\chi(\text{H}_{11}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13})$
15	925	929	942	928	933	0.9	938	924	930	0.4	$\chi(\text{H}_{19}\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{16})$, $\chi(\text{H}_{10}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13})$, $\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_2\text{H}_{19})$
16	973	971	990	975	971	16.1	992	977	972	9.9	$Q(\text{C}_1\text{O}_7)$, $\chi(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{C}_1\text{H}_9)$, $\chi(\text{H}_{11}\text{C}_6\text{C}_1\text{H}_9)$, $\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{C}_5)$
17	1028	1028	1040	1024	1022	5.2	1037	1021	1020	2.9	$Q(\text{C}_3\text{C}_2)$, $Q(\text{C}_6\text{C}_5)$, $\beta(\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{16})$, $\beta(\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13})$
18	1049	1051	1059	1043	1041	10.9	1070	1054	1054	1.9	$Q(\text{C}_1\text{C}_2)$, $\beta(\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{13})Q(\text{C}_6\text{C}_1)$, $\beta(\text{C}_4\text{C}_3\text{H}_{16})$
19	1066	1066	1089	1073	1070	5.2	1090	1074	1058	127.2	$\beta(\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{17})$, $\beta(\text{C}_3\text{C}_2\text{H}_{18})$, $\beta(\text{C}_3\text{C}_2\text{H}_{19})$, $\beta(\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{18})$
20	1078	1074	1098	1082	1077	7.1	1093	1077	1082	0.3	$Q(\text{C}_3\text{C}_4)$, $Q(\text{C}_5\text{C}_4)$, $Q(\text{C}_3\text{C}_2)$, $Q(\text{C}_6\text{C}_5)$, $\beta(\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{18})$
21	1083	1093	1111	1094	1082	67.3	1106	1089	1073	3.7	$Q(\text{C}_1\text{O}_7)$, $\beta(\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8)$, $(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{C}_1\text{C}_6)$, $(\text{C}_2\text{C}_1\text{C}_6\text{H}_{11})$
22	1142	1148	1166	1149	1144	10.1	1152	1135	1127	0.6	$\chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{14})$
23	1168	1176	1193	1175	1168	5.1	1216	1198	1190	1.3	$\chi(\text{H}_{15}\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{13})$, $\chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15})$, $\chi(\text{H}_{15}\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{12})$
24	1240	1240	1267	1248	1240	28.5	1245	1226	1218	2.4	$\beta(\text{C}_1\text{C}_7\text{H}_8)$, $\chi(\text{H}_{11}\text{C}_6\text{C}_1\text{H}_9)$, $\chi(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{C}_1\text{H}_9)$, $\chi(\text{H}_{19}\text{C}_2\text{C}_1\text{H}_9)$



25	1260	1258	1291	1272	1264	3.9	1291	1272	1263	2.3	$\chi(\text{H}_{10}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13}), \chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_2\text{H}_{19}), \beta(\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{13}), \beta(\text{C}_4\text{C}_3\text{H}_{16})$
26	1260	1258	1298	1279	1268	2.8	1299	1280	1269	3.4	$\beta(\text{C}_5\text{C}_4\text{H}_{14}), \beta(\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{14}), \beta(\text{C}_5\text{C}_4\text{H}_{15}), \beta(\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15})$
27	1305	1296	1312	1292	1287	14.7	1330	1310	1302	14.1	$\beta(\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8), \beta(\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{18}), \beta(\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{19}), \chi(\text{H}_9\text{C}_1\text{C}_6\text{H}_{10})$
28	1333	1312	1355	1335	1325	3.2	1348	1328	1317	0.7	$\beta(\text{C}_1\text{C}_6\text{H}_{10}), \beta(\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{19}), \chi(\text{H}_9\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{19}), \chi(\text{H}_9\text{C}_1\text{C}_6\text{H}_{10})$
29	1339	1328	1367	1346	1336	0.9	1384	1363	1353	1.3	$\chi(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{C}_1\text{H}_9), \beta(\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{18}), \chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_2\text{H}_{18}), \beta(\text{C}_1\text{C}_6\text{H}_{10})$
30	1349	1337	1384	1363	1351	0.4	1395	1374	1361	2.7	$\chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15}), \beta(\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15}), \beta(\text{C}_5\text{C}_4\text{H}_{15}), \chi(\text{H}_{15}\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{12})$
31	1364	1347	1398	1377	1366	0.8	1396	1375	1362	12.9	$\beta(\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{14}), \beta(\text{C}_5\text{C}_4\text{H}_{14}), \chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{14}), \chi(\text{H}_{12}\text{C}_5\text{C}_4\text{H}_{14})$
32	1364	1365	1401	1380	1366	6.4	1402	1381	1370	3.3	$\beta(\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{16}), \beta(\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{13}), \beta(\text{C}_4\text{C}_3\text{H}_{16}), \beta(\text{C}_4\text{C}_5\text{H}_{13})$
33	1368	1365	1418	1397	1379	20.2	1406	1385	1362	1.4	$\chi(\text{H}_9\text{C}_1\text{C}_2\text{H}_{19}), \chi(\text{H}_9\text{C}_1\text{C}_2\text{C}_3), \beta(\text{C}_2\text{C}_1\text{H}_9), \chi(\text{H}_9\text{C}_1\text{O}_7\text{H}_8)$
34	1399	1422	1458	1436	1414	7.5	1447	1425	1402	53.7	$\chi(\text{H}_{10}\text{C}_6\text{C}_1\text{H}_9), \chi(\text{C}_5\text{C}_6\text{C}_1\text{H}_9), \beta(\text{C}_2\text{C}_1\text{H}_9), \beta(\text{H}_9\text{C}_1\text{O}_7)$
35	1438	1439	1513	1490	1472	0.2	1511	1488	1471	0.0	$\alpha(\text{H}_{11}\text{C}_6\text{H}_{10}), \alpha(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{H}_{19}), \chi(\text{H}_{10}\text{C}_6\text{C}_5\text{H}_{12}), \chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_2\text{H}_{18})$
36	1438	1439	1517	1494	1471	1.7	1516	1493	1473	0.5	$\alpha(\text{H}_{14}\text{C}_4\text{H}_{15}), \alpha(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{H}_{19}), \chi(\text{H}_{16}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{14})$
37	1449	1449	1519	1496	1479	3.7	1518	1495	1479	3.1	$\alpha(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{H}_{16}), \alpha(\text{H}_{13}\text{C}_5\text{H}_{12}), \chi(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{C}_4\text{H}_{15}), \chi(\text{H}_{18}\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{17})$
38	1460	1449	1524	1501	1484	8.0	1523	1500	1483	11.0	$\alpha(\text{H}_{12}\text{C}_3\text{H}_{13}), \alpha(\text{H}_{17}\text{C}_3\text{H}_{16}), \chi(\text{H}_{19}\text{C}_2\text{C}_3\text{H}_{17})$
39	1468	1468	1540	1517	1494	1.7	1538	1515	1492	2.2	$\alpha(\text{H}_{14}\text{C}_4\text{H}_{15}), \alpha(\text{H}_{19}\text{C}_2\text{H}_{18}), \alpha(\text{H}_{11}\text{C}_6\text{H}_{10}), \alpha(\text{H}_{13}\text{C}_5\text{H}_{12})$
40			2952	2804	2863	51.0	3000	2850	2827	7.4	$q(\text{C}_1\text{H}_9)$
41			3019	2868	2810	42.0	3006	2856	2821	35.9	$q(\text{C}_6\text{H}_{10}), q(\text{C}_6\text{H}_{11})$
42			3023	2872	2820	13.9	3021	2870	2815	13.2	$q(\text{C}_3\text{H}_{17}), q(\text{C}_4\text{H}_{14}), q(\text{C}_5\text{H}_{12})$
43			3025	2874	2837	19.9	3026	2875	2807	14.1	$q(\text{C}_5\text{H}_{12}), q(\text{C}_4\text{H}_{14}), q(\text{C}_3\text{H}_{17})$
44			3029	2878	2841	33.9	3030	2879	2847	37.9	$q(\text{C}_4\text{H}_{14}), q(\text{C}_4\text{H}_{15}), q(\text{C}_5\text{H}_{12}), q(\text{C}_3\text{H}_{17})$
45			3041	2889	2857	21.2	3049	2897	2907	38.7	$q(\text{C}_2\text{H}_{18}), q(\text{C}_2\text{H}_{19})$
46			3063	2910	2918	44.3	3073	2919	2941	61.0	$q(\text{C}_6\text{H}_{11}), q(\text{C}_6\text{H}_{10}), q(\text{C}_5\text{H}_{13})$
47			3073	2919	2937	57.2	3074	2920	2933	51.3	$q(\text{C}_4\text{H}_{15}), q(\text{C}_4\text{H}_{14}), q(\text{C}_5\text{H}_{13})$
48			3076	2922	2936	42.7	3079	2925	2930	52.9	$q(\text{C}_3\text{H}_{16}), q(\text{C}_5\text{H}_{13})$
49			3081	2927	2932	69.3	3084	2930	2945	45.7	$q(\text{C}_5\text{H}_{13}), q(\text{C}_3\text{H}_{16}), q(\text{C}_4\text{H}_{14})$
50			3091	2936	2942	59.9	3089	2935	2947	64.9	$q(\text{C}_2\text{H}_{19}), q(\text{C}_2\text{H}_{18})$
51			3735	3548	3549	6.0	3723	3537	3516	6.1	$q(\text{O}_7\text{H}_8)$

Примечание. *Введены обозначения координат, принятые в теоретической колебательной спектроскопии: q – валентное колебание связи, содержащей атом водорода; Q – валентное колебание связи; α, β, χ – плоские деформационные колебания углов.

Note. *The coordinate designations adopted in theoretical vibrational spectroscopy are introduced: q is the stretching vibration of a bond containing a hydrogen atom; Q is the stretching vibration of a bond; α, β, χ are the plane deformation vibrations of angles.



Из общего предварительного анализа табл. 2 следует, что в области валентных и деформационных колебаний шестичленного кольца и связей С–О, ($400\text{--}1500\text{ см}^{-1}$) и в области валентных колебаний связей С–Н и О–Н ($2800\text{--}3600\text{ см}^{-1}$) превышения рассчитанных гармонических частот над измеренными, составляют соответственно 1.5 и 5%. Эти превышения минимизированы масштабированием частот [21] и с учетом ангармонизма. Ангармонические частоты валентного колебания связи О–Н (3549 и 3516 см^{-1} в конформерах 1 и 2 соответственно) превышают на $\sim 300\text{ см}^{-1}$ положение центра тяжести полос с аномальными ширинами и интенсивностями в измеренных ИК спектрах, соответствующих этому колебанию. Указанное превышение есть следствие ограниченности модели изолированной молекулы, не учитывающей влияния водородной связи на ИК спектр.

Для дальнейшего выявления преимуществ учета ангармонизма остановимся на анализе измеренных и вычисленных частот колебаний более детально. Одна из трудностей при таком анализе, связана с тем, что измеренные спектры принадлежат образцам, состоящим из Н-комплексов конформеров 1 и 2 [19], а ангармонические частоты рассчитаны для изолированных конформеров. Установлено, что комплексообразование и ангармонизм при их учете вносят сравнимые по величине поправки к частотам колебаний $\nu_6 - \nu_9$, $\nu_{21} - \nu_{24}$, ν_{27} , ν_{33} , ν_{34} в области $400\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ (в табл. 2 они набраны курсивом). Однозначного ответа на вопрос о преимуществе учета ангармонизма из анализа этих частот не имеется. В области $3040\text{--}3550\text{ см}^{-1}$ проявляется валентное колебание связи О–Н (ν_{51}). Влияние на него водородной связи, как следует из результатов работы [22], существенно превышает влияние ангармонизма.

С учетом сказанного основное внимание целесообразно сосредоточить на колебаниях структурных элементов конформеров 1 и 2, удаленных от ядра Н-комплекса, испытывающих минимальное влияние водородной связи. Это колебания $\nu_{10} - \nu_{20}$, ν_{25} , ν_{26} , $\nu_{28} - \nu_{32}$, $\nu_{35} - \nu_{39}$ в области $400\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ и валентные колебания связей С–Н ($\nu_{40} - \nu_{50}$) в области $2800\text{--}2940\text{ см}^{-1}$, для которых учет ангармонизма является определяющим.

В кристаллической фазе II в соответствии с экспериментальными данными [19] реализуются Н-комплексы конформера 1 циклогексанола. В области $790\text{--}1080\text{ см}^{-1}$ расхождение вычис-

ленных гармонических частот $\nu_{10} - \nu_{20}$ с измеренными ограничено интервалом $\sim 10\text{--}20\text{ см}^{-1}$, масштабированных $\sim 1\text{--}7\text{ см}^{-1}$, ангармонических $\sim 1\text{--}8\text{ см}^{-1}$, т. е. в данной области масштабированные гармонические и ангармонические частоты нормальных колебаний одинаково удовлетворительно согласуются с измеренными. Для частот ν_{25} , ν_{26} , $\nu_{28} - \nu_{32}$, $\nu_{35} - \nu_{39}$ области $1080\text{--}1550\text{ см}^{-1}$ соответствующие интервалы составили $\sim 22\text{--}38\text{ см}^{-1}$ для гармонических, $\sim 2\text{--}19\text{ см}^{-1}$ для масштабированных и $\sim 2\text{--}8\text{ см}^{-1}$ для ангармонических частот, т. е. учет ангармонизма дает преимущество.

На рис. 3 представлены измеренный ИК спектр кристаллической фазы II и рассчитанный спектр конформера 1. Здесь и далее, на рис. 4–6, сплошная линия – измеренный спектр, вертикальные отрезки соответствуют рассчитанным частотам и интенсивностям.

В области $2800\text{--}2940\text{ см}^{-1}$ ($\nu_{40} - \nu_{50}$) указанное преимущество более очевидно. На рис. 4 приведены ИК спектры циклогексанола: экспериментальный, принадлежащий кристаллической фазе II, и рассчитанные (конформер 1) в гармоническом (а, частоты масштабированы) и ангармоническом (б) приближениях.

Экспериментальный спектр в данной области представлен широкой двугорбой полосой, не обладающей четкой структурой, что является следствием комплексообразования: образец состоит из тримеров, тетрамеров и цепочечных ассоциатов конформера 1. Частоты колебаний конформера расщепляются при образовании Н-комплексов на три, четыре и т. д. близко расположенных компонент. В области $2800\text{--}2940\text{ см}^{-1}$ измеренного спектра проявляется, таким образом, 33 валентных колебания С–Н тримера, 44 – тетрамера и еще большее – цепочечного ассоциата; все это находит свое отражение в структуре полосы в данной области. Величина расщепления для частот $\nu_{42}\text{--}\nu_{50}$ составила от 2 до 9 см^{-1} . Для частот ν_{40} и ν_{41} она равна 25 и 1 см^{-1} в тетрамере, 40 и 3 см^{-1} в тримере, 125 и 34 см^{-1} во фрагменте цепочечного ассоциата. Указанные две частоты соответствуют валентным колебаниям связей $\text{C}_1\text{--H}_9$ (ν_{40}), и комбинации валентных колебаний связей $\text{C}_6\text{--H}_{10}$, $\text{C}_1\text{--H}_{11}$ (ν_{41}), находящихся вблизи ядер образовавшихся Н-комплексов и испытывают влияние водородной связи: ν_{40} – в большей степени, ν_{41} в меньшей, и только в цепочечном ассоциате.

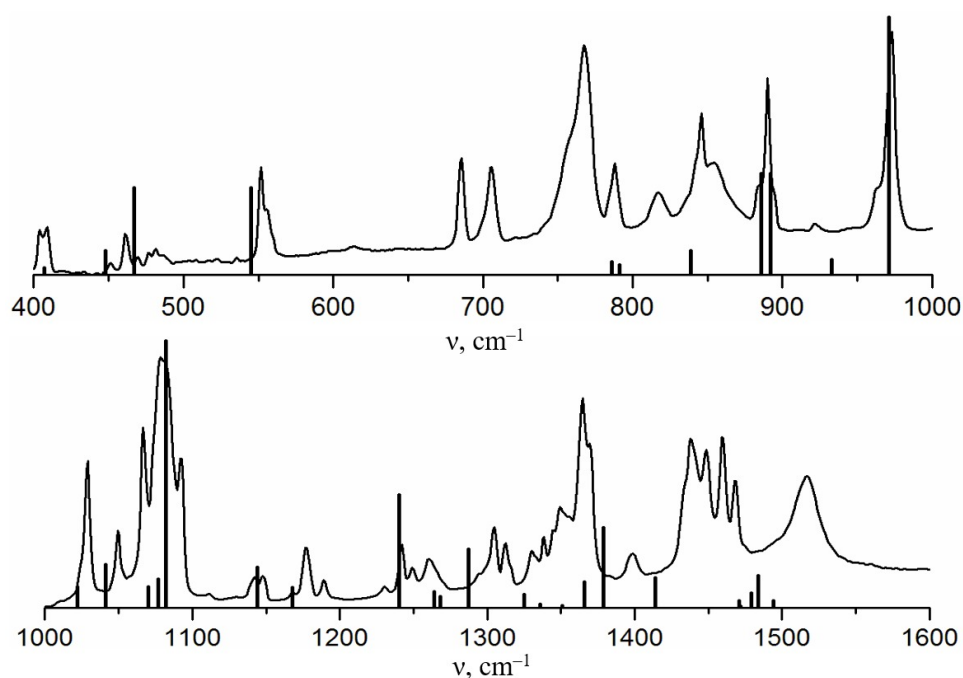


Рис. 3. ИК спектры циклогексанола: измеренный (кристаллическая фаза II), и рассчитанный (конформер 1)
Fig. 3. IR spectra of cyclohexanol: measured (crystalline phase II) and calculated (conformer 1)

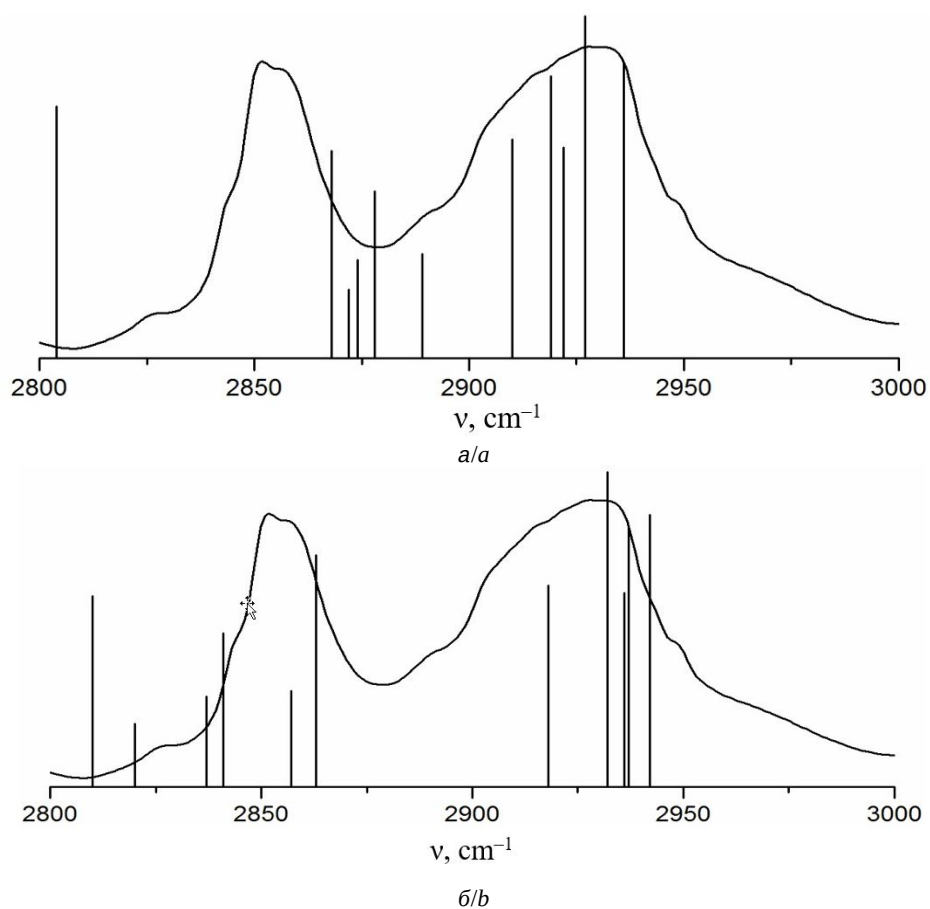


Рис. 4. ИК спектры циклогексанола: измеренный (кристаллическая фаза II) рассчитанные в гармоническом (а) и ангармоническом (б) приближениях (конформер 1)

Fig. 4. IR spectra of cyclohexanol: measured (crystalline phase II), calculated in the harmonic (a) and anharmonic (b) approximations (conformer 1)



Из рис. 4 видно, что рассчитанный в ангармоническом приближении спектр в данной области ближе к экспериментальному. Отметим как положительный факт, что благодаря учету ангармонизма уточнена интерпретация колебаний ν_{40} и ν_{41} (см. табл. 2).

В кристаллической фазе III в соответствии с данными [19] одновременно реализуются Н-комплексы конформеров 1, 2 (рис. 5). В области $780\text{--}1080\text{ см}^{-1}$ расхождение гармонических частот с измеренными составляет $\sim 5\text{--}24\text{ см}^{-1}$ для конформера 2, для масштабированных $\sim 0\text{--}16\text{ см}^{-1}$ и для ангармонических $\sim 0\text{--}13\text{ см}^{-1}$ соответственно. Как и в случае с кристаллической фазой II, масштабированные гармонические и ангармонические частоты нормальных колебаний одинаково удовлетворительно согласуются с измеренными. Для области $1080\text{--}1550\text{ см}^{-1}$ расхождение измеренных и вычисленных гармонических частот для конформера 2 составляет: $\sim 33\text{--}58\text{ см}^{-1}$, масштабированных $\sim 14\text{--}37\text{ см}^{-1}$, ангармонических $\sim 5\text{--}25\text{ см}^{-1}$, что указывает на преимущество использования ангармонического приближения.

В области частот $2800\text{--}2940\text{ см}^{-1}$ ($\nu_{40}\text{--}\nu_{50}$) учет механического ангармонизма улучшил

согласие рассчитанных спектров с экспериментальными (рис. 6) и позволил уточнить отнесение частот ν_{40} и ν_{41} (см. табл. 2).

Дальнейший анализ связан выявлением обертонов, составных частот и резонансов. Как выяснилось, многие измеренные частоты фундаментальных колебаний конформеров 1 и 2 и их Н-комплексов могут совпадать с обертонами или составными частотами других фундаментальных колебаний (табл. 3, 4). Резонансы при этом не обнаруживаются. Положительным результатом стало уточнение интерпретации измеренного спектра кристаллической фазы II в области $1430\text{--}1540\text{ см}^{-1}$. Согласно результатам расчета в гармоническом приближении полосы ИК спектра в указанной области отнесены к фундаментальным деформационным (ножничным) колебаниям группы CH_2 в конформерах [21] и Н-комплексах [22] циклогексанола. Полоса с максимумом на частоте 1517 см^{-1} проявляется только в измеренном спектре кристаллической фазы II (в спектрах фазы III и пластической фазы она отсутствует). Ангармоническая частота ножничного колебания ν_{39} в конформерах 1 и 2 на 23 см^{-1} меньше гармонической масштабированной, что, на наш взгляд,

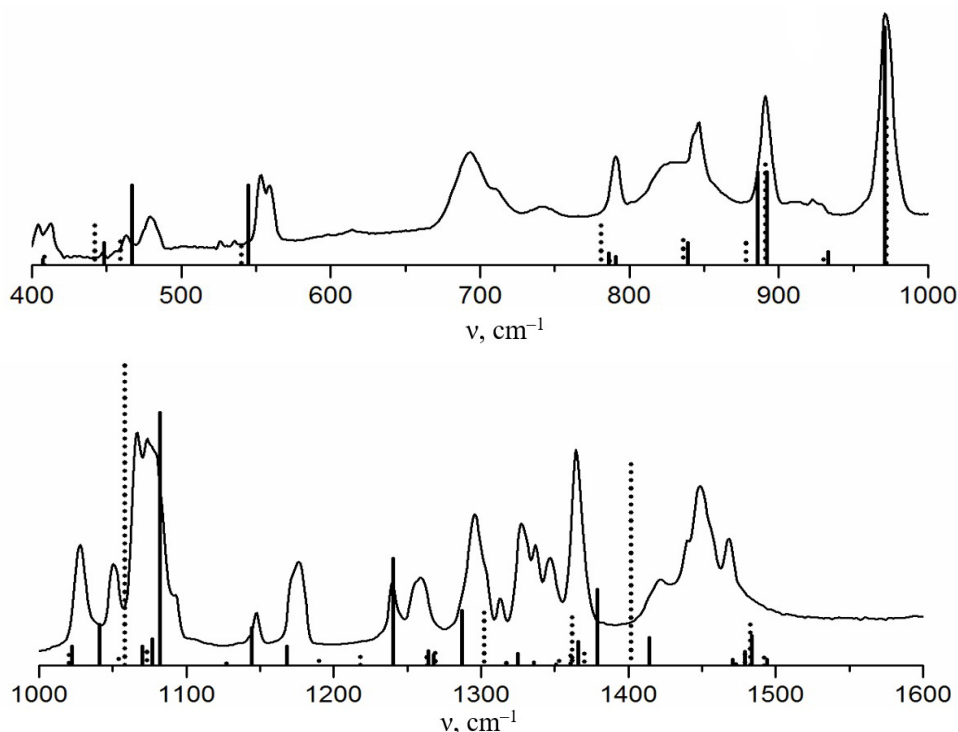


Рис. 5. ИК спектры циклогексанола: измеренный (кристаллическая фаза III) и рассчитанные (конформер 1 (сплошная линия), конформер 2 (пунктирная линия))

Fig. 5. IR spectra of cyclohexanol: measured (crystalline phase III), calculated (conformer 1 (solid line), conformer 2 (dotted line))

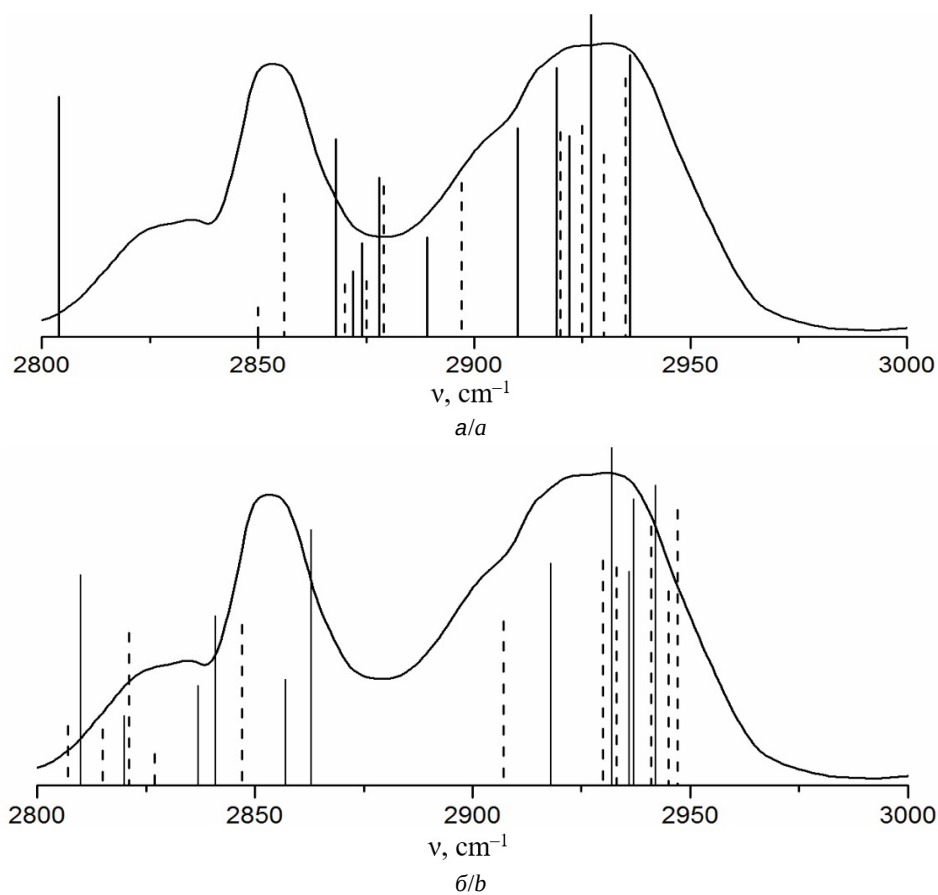


Рис. 6. ИК спектры циклогексанола: измеренный (кристаллическая фаза III), рассчитанные в гармоническом (а) и ангармоническом (б) приближениях (конформер 1 (сплошная линия), конформер 2 (прерывистая линия))

Fig. 6. IR spectra of cyclohexanol: measured (crystalline phase III), calculated in the harmonic (a) and anharmonic (b) approximations (conformer 1 (solid line), conformer 2 (broken line))

Таблица 3 / Table 3

Частоты составных тонов и обертонов в ИК спектре фазы II (конформер 1)
Frequencies of composite tones and overtones in the IR spectrum of phase II (conformer 1)

$\nu_{exp}, \text{cm}^{-1}$	$\nu_{theor}, \text{cm}^{-1}$	Интерпретация / Interpretation	$\nu_{exp}, \text{cm}^{-1}$	$\nu_{theor}, \text{cm}^{-1}$	Интерпретация / Interpretation
789	789	$\nu_5 + \nu_7$	1339	1336	$\nu_9 + \nu_{11}$
814	814	$2\nu_6$		1337	$\nu_7 + \nu_{14}$
889	887	$\nu_5 + \nu_9$		1344	$\nu_4 + \nu_{17}$
1049	1044	$\nu_1 + \nu_{13}$	1364	1363	$\nu_4 + \nu_{18}$
	1049	$\nu_1 + \nu_{14}$		1364	$\nu_5 + \nu_{17}$
1176	1181	$\nu_1 + \nu_{17}$	1399	1402	$\nu_8 + \nu_{15}$
	1182	$\nu_5 + \nu_{12}$		1406	$\nu_3 + \nu_{19}$
1250	1254	$\nu_8 + \nu_{10}$	1438	1436	$\nu_9 + \nu_{14}$
1294	1292	$\nu_6 + \nu_{13}$		1437	$\nu_8 + \nu_{16}$
	1297	$\nu_6 + \nu_{14}$	1517	1508	$\nu_8 + \nu_{18}$
1305	1305	$\nu_3 + \nu_{16}$		1510	$\nu_5 + \nu_{23}$
1330	1327	$\nu_1 + \nu_{20}$		1516	$\nu_9 + \nu_{16}$
	1333	$\nu_7 + \nu_{13}$			

Примечание. Курсивом выделены данные, отражающие учет ангармонизма.
 Note. Data in *italics* reflect the consideration of anharmonicity.



более правдоподобно: область проявления ножничных колебаний групп CH_2 в циклогексане в диапазоне $1440\text{--}1460\text{ см}^{-1}$ [2]. Наличие гидроксильной группы в циклогексаноле способно повлиять на колебания ближайшей к ней группы CH_2 , но, как показал расчет с учетом ангармонизма, значения ν_{39} и ν_{38} не превышают 1494 см^{-1} . Влияние водородной связи приводит к сдвигу и расщеплению в пределах $3\text{--}7\text{ см}^{-1}$. Таким образом, полоса с максимумом 1517 см^{-1} соответствует трем колебаниям с составными частотами $1508\text{ см}^{-1} = \nu_8 + \nu_{18}$, $1510\text{ см}^{-1} = \nu_5 + \nu_{23}$ и $1516\text{ см}^{-1} = \nu_9 + \nu_{16}$. Колебания ν_5 , ν_8 , ν_9 , ν_{16} , ν_{18} и ν_{23} обладают достаточно высокой интенсивностью.

Таблица 4 / Table 4

Частоты составных тонов в ИК спектре фазы III (конформер 2)

Frequencies of composite tones in the IR spectrum of phase III (conformer 2)

$\nu_{\text{эксп}}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{\text{теор}}, \text{см}^{-1}$	Интерпретация / Interpretation
929	929	$\nu_3 + \nu_{10}$
971	979	$\nu_2 + \nu_{11}$
1074	1078	$\nu_3 + \nu_{15}$
1296	1294	$\nu_5 + \nu_{16}$
1312	1319	$\nu_2 + \nu_{22}$
1337	1340	$\nu_3 + \nu_{23}$
1347	1343	$\nu_5 + \nu_{17}$
	1350	$\nu_8 + \nu_{14}$
1449	1449	$\nu_5 + \nu_{22}$

Оценка резонансных взаимодействий указанных составных тонов и основных тонов $\nu_{38} = 1484$ и $\nu_{39} = 1494\text{ см}^{-1}$ следует из анализа фрагмента матрицы взаимодействий (табл. 5), на главной диагонали которой стоят невозмущенные ангармонические частоты. В табл. 6 приведены собственные векторы этих частот, нормированные на единицу. Из опыта ранее проводимых автором исследований резонансов следует, что если таковые характерны для динамики молекулярной системы, то они явно обнаруживаются в экспериментальных спектрах. При этом в матрице взаимодействий недиагональные матричные элементы оказались малыми, на порядок ниже тех [9, 26], при которых резонанс возможен. Поэтому вероятность резонанса Ферми и резонансов более высокого порядка в циклогексаноле, как выяснилось, мала, что согласуется с экспериментальными данными по его ИК спектрам: резонансов в них

не наблюдается. Полоса с максимумом на частоте 1517 см^{-1} есть суперпозиция составных колебаний $\nu_8 + \nu_{18}$, $\nu_5 + \nu_{23}$, $\nu_9 + \nu_{16}$.

Таблица 5 / Table 5

Фрагмент матрицы взаимодействий основных и составных тонов колебаний молекулы циклогексанола
Fragment of the matrix of interactions of the main and composite tones of vibrations of the cyclohexanol molecule

	ν_{39}	ν_{38}	$\nu_9 + \nu_{16}$	$\nu_8 + \nu_{18}$	$\nu_5 + \nu_{23}$
ν_{39}	1495	0	-2.01	-0.57	1.49
ν_{38}	0	1485	2.95	0	-0.15
$\nu_9 + \nu_{16}$	-2.01	2.95	1515	0	0
$\nu_8 + \nu_{18}$	-0.57	0	0	1508	0
$\nu_5 + \nu_{23}$	1.49	-0.15	0	0	1511

Таблица 6 / Table 6

Ангармонические частоты и их собственные векторы

Anharmonic frequencies and their eigenvectors

$\begin{pmatrix} 1485 & 1495 & 1515 & 1511 & 1508 \\ 0.020 & -0.990 & 0.100 & -0.087 & -0.040 \\ -0.995 & -0.030 & -0.096 & 0.001 & -0.002 \\ 0.098 & -0.093 & -0.990 & -0.046 & -0.011 \\ 0.001 & -0.042 & -0.008 & 0.016 & 0.999 \\ -0.007 & 0.090 & 0.036 & -0.995 & 0.020 \end{pmatrix}$
--

Выводы

На основании результатов учета механического ангармонизма при построении структурно-динамических моделей изолированных конформеров 1 и 2 циклогексанола установлено, что согласие измеренных и рассчитанных частот в областях $1080\text{--}1550\text{ см}^{-1}$ и $2800\text{--}2940\text{ см}^{-1}$ ИК спектра существенно улучшилось по сравнению гармоническими масштабированными частотами. Следствием этого улучшения стало уточнение интерпретации частот ν_{40} и ν_{41} валентных колебаний связей С–Н, ближайших к ядру Н-комплекса, и полосы с максимумом на частоте 1517 см^{-1} в спектре кристаллической фазы II, которая является суперпозицией составных колебаний $\nu_8 + \nu_{18}$, $\nu_5 + \nu_{23}$, $\nu_9 + \nu_{16}$. Таким образом, обоснована целесообразность использования ангармонического приближения в данном конкретном случае. Выявить наличие резонансов в динамике циклогексанола не удалось. Теоретически установлено, что резонансные взаимодействия в конформерах циклогексанола малы, поэтому вероятность их обнаружения в ИК спектрах невелика. Это вывод согласуется с результатами анализа экспериментальных ИК циклогексанола.



Список литературы

1. Волькенштейн М. А., Грибов Л. А., Ельяшевич М. А., Степанов Б. И. Колебания молекул. М. : Наука, 1972. 700 с.
2. Свердлов Л. М., Ковнер М. А., Крайнов Е. П. Колебательные спектры многоатомных молекул. М. : Наука, 1970. 560 с.
3. Грибов Л. А. Введение в молекулярную спектроскопию. М. : Наука, 1976. 400 с.
4. Грибов Л. А., Дементьев В. А. Моделирование колебательных спектров сложных соединений на ЭВМ. М. : Наука, 1989. 160 с.
5. Pulay P., Fogarasi G., Pongor G., Boggs J. E., Vargha A. Combination of theoretical ab initio and experimental information to obtain reliable harmonic force constants. Scaled quantum mechanical (QM) force fields for glyoxal, acrolein, butadiene, formaldehyde, and ethylene // J. Am. Chem. Soc. 1983. Vol. 105, № 24. P. 7037–7047. <https://doi.org/10.1021/ja00362a005>
6. Yashida H., Takeda K., Okamura J., Ehara A., Matsuura H. A New Approach to Vibrational Analysis of Large Molecules by Density Functional Theory: Wavenumber-Linear Scaling Method // J. Phys. Chem. A. 2002. Vol. 106, № 14. P. 3580–3586. <https://doi.org/10.1021/jp013084m>
7. Березин К. В., Кривохижина Т. В., Нечаев В. В. Применение метода линейного масштабирования частот в расчетах нормальных колебаний многоатомных молекул // Оптика и спектроскопия. 2003. Т. 94, № 3. С. 398–401.
8. Handy N. C., Willets A. Anharmonic constants for benzene // Spectrochim. Acta. 1997. Vol. 53, № 8. P. 1169–1177. [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(96\)01864-1](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(96)01864-1)
9. Березин К. В., Нечаев В. В., Элькин П. М. Ангармонический анализ колебательных состояний пиридина методом функционала плотности // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 97, № 2. С. 224–234.
10. Бабков Л. М., Успенский К. Е., Давыдова Н. А. Структурно-динамическая модель молекулы 2-бифенилметанола в ангармоническом приближении // Журнал прикладной спектроскопии. 2009. Т. 76, № 6. С. 843–852.
11. Элькин М. Д., Бабков Л. М. Учёт ангармонического смещения полос в модельных расчётах колебательных спектров димеров с водородной связью // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2011. Т. 11, вып. 1. С. 20–25.
12. Kelley K. K. Cyclohexanol and the third law of thermodynamics // J. Am. Chem. Soc. 1929. Vol. 51, № 5. P. 1400–1406.
13. Neelakantan R. Raman spectrum of cyclohexanol // Proc. Indian Acad. Sci. A. 1963. Vol. 57. P. 94–102. <https://doi.org/10.1007/BF03046321>
14. Green J., Griffith W. T. Phase transformations in solid cyclohexanol // J. Phys. Chem. Solids. 1965. Vol. 26, № 3. P. 631–637. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(65\)90139-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90139-3)
15. Adachi K., Suga H., Seki S. Phase changes in crystalline and glassy-crystalline cyclohexanol // Bull. Chem. Soc. Jpn. 1968. Vol. 41, № 5. P. 1073–1087. <https://doi.org/10.1246/bcsj.41.1073>
16. Wunderlich B. The detection of conformational disorder by thermal analysis // Pure and Appl. Chem. 1989. Vol. 61, № 8. P. 1347–1351. <https://doi.org/10.1351/pact198961081347>
17. Inscore F., Gift A., Maksymiuk P., Farquharson S. Characterization of chemical warfare G-agent hydrolysis products by surface-enhanced Raman spectroscopy // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5585. P. 46–52. <https://doi.org/10.1117/12.580461>
18. Bonnet A., Chisholm J., Sam Motherwell W. D., Jones W. Hydrogen bonding preference of equatorial versus axial hydroxyl groups in pyran and cyclohexane rings in organic crystals // Cryst. Eng. Comm. 2005. Vol. 7, № 9. P. 71–75. <https://doi.org/10.1039/B417569G>
19. Ibberson R. M., Parsons S., Allan D. R., Bell A. M. T. Polymorphism in cyclohexanol // Acta Cryst. 2008. Vol. B64. P. 573–582. <https://doi.org/10.1117/S010876.8108025093>
20. Элькин П. М., Шальнова Т. А., Гордеев И. И. Структурно-динамические модели конформеров циклогексанола // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2010. Т. 11, № 3. С. 41–45.
21. Бабков Л. М., Давыдова Н. А., Моисейкина Е. А. ИК спектры циклогексанола и структурно-динамическая модель молекулы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2012. Т. 12, вып. 1. С. 54–62.
22. Бабков Л. М., Давыдова Н. А., Моисейкина Е. А. Водородная связь и её влияние на структуру и колебательные спектры циклогексанола // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2013. Т. 13, вып. 1. С. 13–26.
23. Кон В. Электронная структура вещества – волновые функции и функционалы плотности // УФН. 2002. Т. 172, № 3. С. 336–348. <https://doi.org/10.3367/UFNr0172.200203e0336>
24. Попл Дж. А. Квантово-химические модели // УФН. 2002. Т. 172, № 3. С. 349–356. <https://doi.org/10.3367/UFNr0172.200203f0349>
25. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B., Scuseria G. E., Robb M. A., Cheeseman J. R., Montgomery J. A., Vreven Jr. T., Kudin K. N., Burant J. C., Millam J. M., Iyengar S. S., Tomasi J., Barone V., Mennucci B., Cossi M., Scalmani G., Rega N., Petersson G. A., Nakatsuji H. [et al.]. Gaussian 03, Revision B.03. Gaussian, Inc., Pittsburgh PA, 2003. 302 p.
26. Бабков Л. М., Пучковская Г. А., Макаренко С. П., Гаврилко Т. А. ИК спектроскопия молекулярных кристаллов с водородной связью. Киев : Наукова думка, 1989. 160 с.

References

1. Volkenshtein M. A., Gribov L. A., Elyashevitch M. A., Stepanov B. I. *Kolebaniya molekul* [Vibrations of molecules]. Moscow, Nauka, 1972. 700 p. (in Russian).
2. Sverdlov L. M., Kovner M. A., Kainov E. P. *Kolebatelnye spektry mnogoatomnykh molekul* [Vibrational



- spectra of polyatomic molecules]. Moscow, Nauka, 1970. 560 p. (in Russian).
3. Gribov L. A. *Vvedenie v molekularmuyu spektroskopiyu* [Introduction to Molecular Spectroscopy]. Moscow, Nauka, 1976. 400 p. (in Russian).
 4. Gribov L. A., Dement'ev V. A. *Modelirovanie kolebatel'nykh spektrov slozhnykh soedineniy na EVM* [Simulation of vibrational spectra of complex compounds on a computer]. Moscow, Nauka, 1989. 160 p. (in Russian).
 5. Pulay P., Fogarasi G., Pongor G., Boggs J. E., Vargha A. Combination of theoretical ab initio and experimental information to obtain reliable harmonic force constants. Scaled quantum mechanical (QM) force fields for glyoxal, acrolein, butadiene, formaldehyde, and ethylene. *J. Am. Chem. Soc.*, 1983, vol. 105, iss. 24, pp. 7037–7047. <https://doi.org/10.1021/ja00362a005>
 6. Yashida H., Takeda K., Okamura J., Ehara A., Matsura H. A New Approach to Vibrational Analysis of Large Molecules by Density Functional Theory: Wavenumber-Linear Scaling Method. *J. Phys. Chem. A*, 2002, vol. 106, no. 1, pp. 3580–3586. <https://doi.org/10.1021/jp013084m>
 7. Berezin K. V., Krivokhijina T. V., Nechayev V. V. Application of the method of linear frequency scaling in calculations of normal vibrations of polyatomic molecules. *Optics and Spectroscopy*, 2003, vol. 94, pp. 398–401 (in Russian).
 8. Handy N. C., Willets A. Anharmonic constants for benzene. *Spectrochim. Acta*, 1997, vol. 53, no. 8, pp. 1169–1177. [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(96\)01864-1](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(96)01864-1)
 9. Berezin K. V., Nechayev V. V., Elkin P. M. Anharmonic analysis of vibrational states of pyrimidine using the density functional method. *Optics and Spectroscopy*, 2004, vol. 97, no. 2, pp. 224–232 (in Russian).
 10. Babkov L. M., Uspenskiy K. E., Davydova N. A. Structural dynamic model of 2-biphenylmethanol molecule in anharmonic approximation. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2009, vol. 76, no. 6, pp. 843–852. (in Russian).
 11. Elkin M. D., Babkov L. M. Taking into account the anharmonic shift of bands in model calculations of the vibrational spectra of dimers with hydrogen bonding. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2011, vol. 11, iss. 1, pp. 20–25 (in Russian).
 12. Kelley K. K. Cyclohexanol and the third law of thermodynamics. *J. Am. Chem. Soc.*, 1929, vol. 51, iss. 5, pp. 1400–1406. <https://doi.org/10.1007/BF03046321>
 13. Neelakantan R. Raman spectrum of cyclohexanol. *Proc. Indian Acad. Sci. A*. 1963, vol. 57, pp. 94–102. <https://doi.org/10.1007/BF03046321>
 14. Green J., Griffith W. T. Phase transformations in solid cyclohexanol. *J. Phys. Chem. Solids*, 1965, vol. 26, iss. 3, pp. 631–637. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(65\)90139-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90139-3)
 15. Adachi K., Suga H., Seki S. Phase changes in crystalline and glassy-crystalline cyclohexanol. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 1968, vol. 41, iss. 5, pp. 1073–1087. <https://doi.org/10.1246/bcsj.41.1073>
 16. Wunderlich B. The detection of conformational disorder by thermal analysis. *Pure and Appl. Chem.*, 1989, vol. 61, no. 8, pp. 1347–1351. <https://doi.org/10.1351/pact198961081347>
 17. Inscore F., Gift A., Maksymiuk P., Farquharson S. Characterization of chemical warfare G-agent hydrolysis products by surface-enhanced Raman spectroscopy. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5585, pp. 46–52. <https://doi.org/10.1117/12.580461>
 18. Bonnet A., Chisholm J., Sam Motherwell W. D., Jones W. Hydrogen bonding preference of equatorial versus axial hydroxyl groups in pyran and cyclohexane rings in organic crystals. *Cryst. Eng. Comm.*, 2005, vol. 7, iss. 9, pp. 71–75. <https://doi.org/10.1039/B417569G>
 19. Ibberson R. M., Parsons S., Allan D. R., Bell A. M. T. Polymorphism in cyclohexanol. *Acta Cryst.*, 2008, vol. B64, pp. 573–582. <https://doi.org/10.1117/S010876.8108025093>
 20. Elkin P. M., Schalnova T. A., Gordeev I. I. Structural-dynamic models of cyclohexanol conformers. *Caspian Journal: Management and High Technology*, 2010, vol. 11, no. 3, pp. 41–45 (in Russian).
 21. Babkov L. M., Davydova N. A., Moiseikina E. A. IR spectra of cyclohexanol and structural-dynamic model of the molecule. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2012, vol. 12, iss. 1, pp. 54–62 (in Russian).
 22. Babkov L. M., Davydova N. A., Moiseikina E. A. Hydrogen bonding and its effect on the structure and vibrational spectra of cyclohexanol. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2013, vol. 13, iss. 1, pp. 13–26 (in Russian).
 23. Kohn W. Nobel Lecture: Electronic structure of matter—wave functions and density functionals. *Rev. Mod. Phys.*, 1999, vol. 71, iss. 5, pp. 1253–1265. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.71.1253>
 24. Pople J. A. Nobel Lecture: Quantum chemical models. *Rev. Mod. Phys.*, 1999, vol. 71, iss. 5, pp. 1267–1274. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.71.1267>
 25. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B., Scuseria G. E., Robb M. A., Cheeseman J. R., Montgomery J. A., Vreven Jr. T., Kudin K. N., Burant J. C., Millam J. M., Iyengar S. S., Tomasi J., Barone V., Mennucci B., Cossi M., Scalmani G., Rega N., Petersson G. A., Nakatsuji H. [et al.]. *Gaussian 03, Revision B.03*. Gaussian, Inc., Pittsburgh PA, 2003. 302 p.
 26. Babkov L. M., Puchkovskaya G. A., Makarenko S. P., Gavrillo T. A. *IK spektroskopiia molekuliarnukh kristallov s vodorodnymi svyaziami* [IR spectroscopy of molecular crystals with hydrogen bonds]. Kiev, Naukova dumka, 1989. 160 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 07.04.2024; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 25.06.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 07.04.2024; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 25.06.2024; published 31.03.2025



ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 37–43
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 37–43
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-37-43>, EDN: IIQEFU

Научная статья
УДК 537.311.3:537.622

Структура, магнитные и электрические свойства La-Sr манганита, легированного церием и цинком

И. М. Державин¹, А. Г. Баделин^{1✉}, В. К. Карпасюк¹, С. Х. Эстемирова^{1,2}

¹Астраханский государственный университет (АГУ) им. В. Н. Татищева, Россия, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 20 а

²Институт металлургии Уральского отделения РАН (ИМЕТ УрО РАН), Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 101

Державин Игорь Михайлович, младший научный сотрудник научной совместной лаборатории конструирования и физико-химических исследований оксидных магнитных материалов, derzh_igor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8037-1909>, AuthorID: 899296

Баделин Алексей Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научной совместной лаборатории конструирования и физико-химических исследований оксидных магнитных материалов, alexey_badelin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1276-840X>, AuthorID: 513426

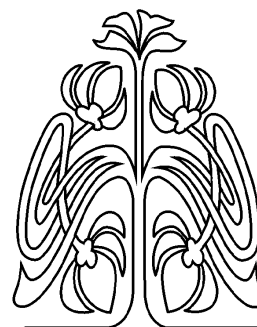
Карпасюк Владимир Корнильевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник научной совместной лаборатории конструирования и физико-химических исследований оксидных магнитных материалов, vkarpasyuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5154-2171>, AuthorID: 338812

Эстемирова Светлана Хусаиновна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник научной совместной лаборатории конструирования и физико-химических исследований оксидных магнитных материалов, старший научный сотрудник лаборатории статики и кинетики процессов, esveta100@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7039-1420>, AuthorID: 114541

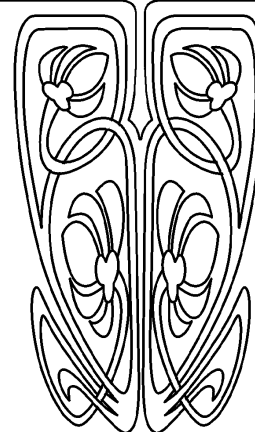
Аннотация. Легированные манганиты La-Sr системы, проявляющие эффекты колоссального магнитосопротивления, гигантской магнитострикции, электрического переключения, являются перспективными функциональными материалами для различных технических приложений, в том числе для сенсорных и информационных устройств. Однако влияние характеристик легирующих ионов, особенно вводимых в разные подрешетки, на свойства манганитов и их частотные зависимости изучено недостаточно. В настоящей работе впервые синтезирован однофазный керамический манганит $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$, содержащий ионы $\text{Ce}^{4+}(5d^0)$ и $\text{Zn}^{2+}(3d^{10})$, являющиеся донорами и акцепторами. Определены параметры ромбоэдрической кристаллической структуры. Намагниченность синтезированного манганита выше, а температура Кюри ниже, чем у манганита базового состава $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$. Большая ширина температурного интервала перехода «ферромагнетик–парамагнетик» свидетельствует о высокой неоднородности полученного манганита. При температурах выше 285 К манганит проявляет свойства полупроводника. Модуль отрицательного магнитосопротивления достигает максимума 18% при температуре 231 К. С повышением частоты в диапазоне 100 кГц – 4 МГц сопротивление манганита уменьшается. Полученные результаты объясняются диамагнитным разбавлением октаэдрической подрешетки, образованием ионов Mn^{2+} , формированием кластеров разновалентных ионов, конкуренцией и сменой различных механизмов переноса зарядов.

Ключевые слова: кристаллическая структура, кластеры, намагниченность, точка Кюри, магнитосопротивление, температурные и частотные зависимости сопротивления, механизмы переноса зарядов

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Астраханского государственного университета (Приоритет-2030) (проект № 1373360549).



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





Для цитирования: Державин И. М., Баделин А. Г., Карпасюк В. К., Эстемирова С. Х. Структура, магнитные и электрические свойства La-Sr манганита, легированного церием и цинком // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 37–43. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-37-43>, EDN: IIQEFU

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Structure, magnetic and electrical properties of La-Sr manganite doped with cerium and zinc

I. M. Derzhavin¹, A. G. Badelin^{1✉}, V. K. Karpasyuk¹, S. Kh. Estemirova^{1,2}

¹Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan 414056, Russia

²Institute for Metallurgy, Ural Branch of the RAS, 101 Amundsen St., Ekaterinburg 620016, Russia

Igor M. Derzhavin, derzh_igor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8037-1909>, AuthorID: 899296

Alexey G. Badelin, alexey_badelin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1276-840X>, AuthorID: 513426

Vladimir K. Karpasyuk, vkarpasyuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5154-2171>, AuthorID: 338812

Svetlana Kh. Estemirova, esveta100@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7039-1420>, AuthorID: 114541

Abstract. Background and Objectives: Doped manganites of La-Sr system exhibiting effects of colossal magnetoresistance, giant magnetostriction, and electrical switching are promising functional materials for various technical applications, in particular for sensor and information devices. However, the influence of characteristics of doping ions, especially those introduced into various sublattices, on the properties of manganites and their frequency dependences has not been sufficiently studied. The aim of this work is to establish the influence of Ce^{4+} ($5d^6$) and Zn^{2+} ($3d^{10}$) ions, which are donors and acceptors, on crystal lattice parameters of manganites, their magnetization, Curie point, magnetoresistance, and dependences of the resistance on the frequency and amplitude of electric field. **Materials and Methods:** For the first time, single-phase ceramic $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$ manganite was synthesized. Parameters of crystal structure were determined from powder X-ray diffractograms. Specific magnetization measurements were performed in magnetic field with an induction of 0.56 T. Curie point was determined by the maximum modulus of the derivative of magnetic permeability with respect to temperature. Measurements of the resistance were performed in the frequency range from 100 kHz to 4 MHz at two values of measuring voltage. Dependences of magnetoresistance on the temperature were measured in transverse field with an induction of 0.92 T. **Results:** The synthesized manganite has a rhombohedral crystal structure. Specific magnetization ($91.2 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ at 80 K) is higher, and Curie temperature (222 K) is lower than that of the manganite of basic composition $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$. A significant width of the temperature range of ferromagnetic–paramagnetic transition (about 45 K) indicates a high inhomogeneity of obtained manganite. At the temperatures exceeding 285 K, manganite exhibits semiconductor properties. The modulus of negative magnetoresistance varies with temperature nonmonotonically and reaches a maximum (18%) at the temperature of 231 K. With an increase in frequency in the range from 100 kHz to 4 MHz, the resistance of manganite decreases with a slowdown of the fall process in the region of 1.5–2 MHz. **Conclusion:** The results obtained are explained by diamagnetic dilution of octahedral sublattice with zinc ions, formation of Mn^{2+} ions, increase in spin fluctuations near Curie point, relationship of electronic band structure with magnetic subsystem of manganite, phase stratification and formation of the clusters of different-valence ions, competition and change of charge transfer mechanisms (hopping, tunneling, percolation) depending on temperature and frequency. Established dependencies are important for understanding the mechanisms of the effect of simultaneous introduction of quadrivalent and divalent ions into various sublattices of manganites on their properties, and are also of interest for obtaining manganites with required parameters.

Keywords: crystal structure, clusters, magnetization, Curie point, magnetoresistance, temperature and frequency dependences of resistance, charge transfer mechanisms

Acknowledgements: This research was supported by the Astrakhan State University Development Program (Priority-2030) (project No. 1373360549).

For citation: Derzhavin I. M., Badelin A. G., Karpasyuk V. K., Estemirova S. Kh. Structure, magnetic and electrical properties of La-Sr manganite doped with cerium and zinc. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 37–43 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-37-43>, EDN: IIQEFU

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Манганиты системы $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, имеющие высокие значения намагниченности насыщения и температуры Кюри при содержании стронция $x \approx 0.35$ [1, 2], часто используются как базовые составы для получения перспективных функциональных материалов с требуемыми параметрами путем легирования соответствующими катионами [3–5]. Составы с $0.175 < x < 0.5$ обладают проводимостью p -типа, обусловленной

сосуществованием ионов Mn^{4+} , Mn^{3+} , и проявляя металлические свойства при достаточно низких температурах, а с повышением температуры испытывают фазовый переход «металл–полупроводник» [1, 2].

Исследованию La-Sr систем, содержащих катионы Ce^{4+} , обеспечивающие электронное легирование, посвящены работы [6–8]. Однако имеющиеся сведения о Ce-замещенных манганитах, относятся к неоднофазным объемным



образцам или к тонким пленкам. В [4, 5, 9] представлены данные о влиянии замещения марганца комбинациями двух- и четырехвалентных ионов на свойства марганитов. Особенно интересным представляется легирование марганитов катионами, вводимыми одновременно в разные подрешетки [5, 8, 10], но данные о свойствах таких марганитов немногочисленны.

В настоящей работе изучены структурные и электромагнитные характеристики лантан-стронциевого марганита с одновременным введением четырехвалентного и двухвалентного ионов, являющиеся, соответственно, донорами и акцепторами: $\text{Ce}^{4+}(5p^6)$ – в редкоземельную подрешетку, ионов $\text{Zn}^{2+}(3d^{10})$ – в подрешетку марганца. При этом уделено внимание зависимости электросопротивления от частоты и амплитуды измерительного электрического поля. Следует отметить, что частотные зависимости электрических параметров таких марганитов (и даже базовых лантан-стронциевых составов) практически не исследованы, а механизмы влияния состава на такие зависимости точно не установлены [11–13]. Приведенные в недавней работе [12] данные об электрических свойствах отдельных составов в диапазоне от 10^2 до 10^6 Гц являются результатом вклада различных транспортных механизмов, проявляющихся в определенных интервалах частот и температур. Представляет интерес сопоставить эти данные с характеристиками легированного марганита La-Sr системы в более широком частотном диапазоне.

1. Объекты и методы исследования

Синтезирован и исследован марганит $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$. Синтез осуществлялся по традиционной керамической технологии. Исходные компоненты (высушенные порошки La_2O_3 , SrCO_3 , CeO_2 , MnO_2 , ZnO), взятые в соответствующих стехиометрических пропорциях, подвергались совместному помолу (с добавлением этилового спирта) в шаровой мельнице в течение четырех часов. После высушивания и брикетирования полученной смеси производился предварительный обжиг при 1273 К (время выдержки – 4 ч). Далее следовали операции второго помола, сушки, введения пластификатора (поливинилового спирта), гранулирования, формования образцов, выжигания связки. Заключительная операция спекания осуществлялась на воздухе при температуре 1523 К

в течение 10 ч с последующим охлаждением вместе с печью.

Полученные в едином технологическом процессе образцы марганита имели форму таблеток диаметром 4 мм и толщиной 2 мм. Для измерений электрических характеристик на противоположные плоскости одной из таблеток были нанесены контакты, изготовленные из самозатвердевающей металлоорганической смеси, содержащей 99% серебра.

Фазовый состав и параметры элементарной ячейки марганитов определялись по порошковым дифрактограммам, снятым в $\text{CuK}\alpha$ -излучении при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 в угловом диапазоне $2\Theta = 20\text{--}70^\circ$ с шагом $\Delta(2\Theta) = 0.02^\circ$. Время набора импульсов составляло 2 с в каждой точке.

Расчет структурных данных выполнен методом Ритвелда [14] с помощью программы GSAS [15]. Погрешность определения параметров решетки не превышала $5 \cdot 10^{-5}$ нм.

Измерения удельной намагниченности (σ) выполнялись баллистическим методом путем регистрации изменения магнитного потока, проходящего через измерительную катушку, которая располагалась в межполюсном пространстве постоянного магнита, при извлечении из нее капсулы с порошкообразным образцом известной массы. Индукция постоянного магнитного поля в межполюсном пространстве составляла 0.56 Тл. Измерения проводились при температуре 80 К, погрешность не превышала $\pm 2\%$ при надежности 0.92.

Магнитная проницаемость при различных температурах ($\mu(T)$) измерялась индукционным методом на частоте 99.9 кГц. Марганит помещался в керамическую капсулу, которая вставлялась внутрь одной из секций двухсекционной измерительной катушки. Вторая секция, включенная в противофазе, обеспечивала компенсацию ЭДС индукции, наводимой возбуждающей катушкой в секциях, при отсутствии марганита.

Вся конструкция охлаждалась до температуры кипения жидкого азота, затем температура медленно повышалась, при этом производилась регистрация напряжения на измерительной катушке. Точка Кюри T_C определялась по максимуму $|d\mu/dT|$ [16].

При измерениях сопротивления и магнитосопротивления марганит вместе с термпарой помещался в измерительную ячейку, которая



располагалась между полюсами электромагнита. Измерялась величина падения напряжения при пропускании стабилизированного постоянного тока. Погрешность измерений не превышала $\pm 2\%$. Измерения магнитосопротивления осуществлялись в магнитном поле с индукцией $B = 0.92$ Тл, направленном перпендикулярно измерительному току. Величина магнитосопротивления вычислялась как

$$MR = (R(B) - R(0))/R(B),$$

где $R(B)$ – электросопротивление в поле B , $R(0)$ – электросопротивление при $B = 0$.

Частотные зависимости сопротивления снимались в диапазоне от 100 Гц до 4 МГц. По данным об индуктивности и емкости измерительной цепи, реактивную составляющую сопротивления можно считать пренебрежимо малой.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены и сопоставлены экспериментальная и расчетная дифрактограммы синтезированного манганита. Расчетная дифракто-

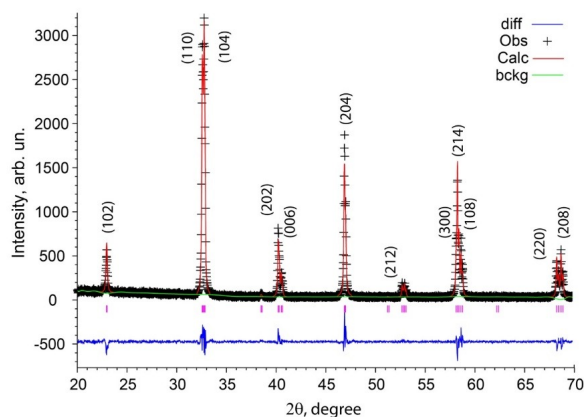


Рис. 1. Экспериментальные (+) и расчетные (Calc) дифракционные профили, разностная кривая (diff) манганита $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$; (bckg) – уровень фона; вертикальными штриховыми линиями показаны позиции брэгговских рефлексов ромбоэдрической фазы (цвет онлайн)

Fig. 1. Experimental (+) and calculated (Calc) diffraction profiles, difference curve (diff) of manganite $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$; (bckg) is the background level; the vertical dashed lines show the positions of Bragg reflexes of the rhombohedral phase (color online)

грамма хорошо аппроксимирует экспериментальные данные. Дифрактограммы содержат рефлексы только ромбоэдрической фазы (пространственная группа $R\bar{3}c$), т. е. полученный манганит является однофазным.

В таблице приведены параметры решетки a , c и объем элементарной ячейки V , а также значения удельной намагниченности σ (при 80 К) и температуры Кюри T_C .

Полученное значение объема элементарной ячейки меньше, чем у манганита базового состава $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ ($V = 350.35 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^3$) вследствие значительно меньшего радиуса иона Ce^{4+} (0.114 нм) по сравнению с радиусом иона La^{3+} (0.136 нм) [17] (радиусы Mn^{3+} и Zn^{2+} отличаются гораздо меньше – на 0.0095 нм). Удельная намагниченность на $5.5 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ выше, а температура Кюри на 112 К ниже. Снижение T_C связано, очевидно, с диамагнитным разбавлением октаэдрической подрешетки ионами цинка со сравнительно большим радиусом и экранированием ими ионов Mn^{4+} . Увеличение намагниченности может быть обусловлено вероятным образованием ионов Mn^{2+} с высоким магнитным моментом ($5 \mu_B$), вступающих в двойное обменное взаимодействие Mn^{2+} -O- Mn^{3+} [8, 18].

На рис. 2 приведен график зависимости $\mu(T)$, свидетельствующий о значительной магнитной неоднородности манганита, возникновение которой стимулируется комбинированным введением двух- и четырехвалентных ионов [4] и приводит к размытию перехода из ферромагнитного в парамагнитное состояние вследствие разброса значений температуры Кюри неоднородностей [11]. Указанные на рисунке значения температуры T_1 и T_2 , соответствующие значениям проницаемости $\mu(T_1) = 0.9 \cdot (\mu_{\text{макс}} - 1) + 1$ и $\mu(T_2) = 0.1 \cdot (\mu_{\text{макс}} - 1) + 1$ ($\mu_{\text{макс}}$ – максимальная величина μ), условно определяют температурный интервал перехода «ферромагнетик-парамагнетик».

В данном случае ширина интервала $\Delta T = T_2 - T_1$ велика – достигает 45 К, поэтому приведенное в таблице значение температуры Кюри следует рассматривать как среднюю величину.

Кристаллографические и магнитные характеристики манганита $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$

Table. Crystallographic and magnetic characteristics of $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$ manganite

Параметры решетки / Lattice parameters		$10^3 \times V, \text{ нм}^3 / 10^3 \times V, \text{ nm}^3$	$\sigma, \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг} / \sigma, \text{ emu/g}$	$T_C, \text{ К}$
$a, \text{ nm}$	$c, \text{ nm}$			
0.549	1.334	348.75	91.2	222

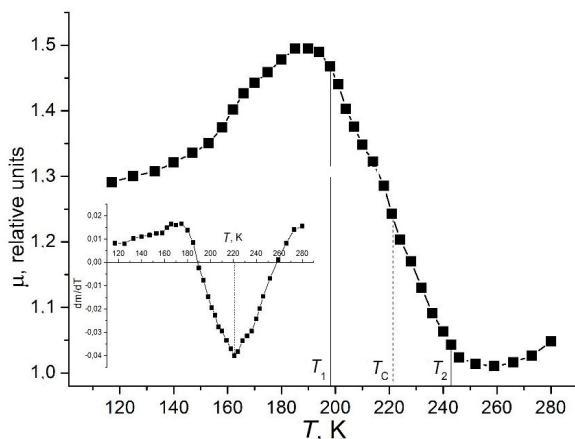


Рис. 2. Температурные зависимости магнитной проницаемости и производной $\mu(T)$ по температуре (произвольные единицы). (T_1 , T_2) – температурный интервал перехода «ферромагнетик-парамагнетик»

Fig. 2. Temperature dependences of magnetic permeability and derivative of $\mu(T)$ with respect to temperature (arbitrary units). (T_1 , T_2) is the temperature range of ferromagnetic-paramagnetic transition

Существование неоднородностей, изоструктурных матрице, но отличающихся параметрами решетки, приводит к уширению рентгеновских дифракционных рефлексов. В данном случае уширение составляет 3–7.5%. Такие неоднородности представляют собой кластеры, формирующиеся вследствие различия зарядов и радиусов ионов, минимизации энергии кулоновского взаимодействия между ними и энергии упругих напряжений [4].

На рис. 3 показаны температурные зависимости сопротивления, измеренные на постоянном токе в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле. Максимумы сопротивления достигаются при температурах выше точки Кюри, что в манганитах La-Sr системы связано с нарастанием спиновых флуктуаций при приближении температуры из парамагнитной области к T_C и уменьшением при этом сопротивления [11]. Поскольку вблизи точки Кюри в манганите содержится смесь ферромагнитной металлической и парамагнитной полупроводниковой фаз, соотношение объемов и проводимость которых зависят от температуры [1, 2, 11], можно предполагать, что формирование полупроводникового характера зависимости объемного сопротивления от температуры начинается в области 210–230 K, где наблюдается некоторое уменьшение производной dR/dT . При температуре выше 285 K манганит заведомо обладает проводимостью полупроводникового типа.

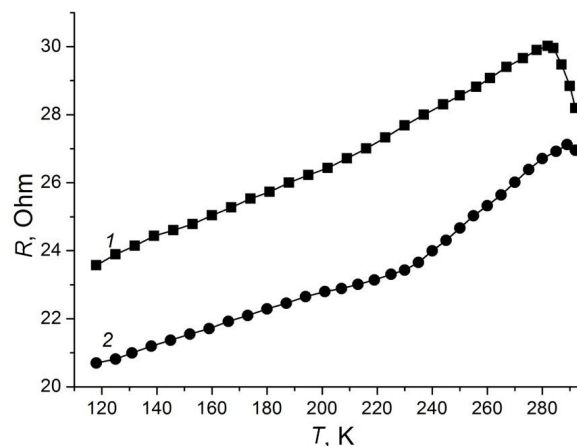


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления манганита в отсутствие магнитного поля (1) и в магнитном поле (2) с индукцией 0.92 Тл

Fig. 3. Temperature dependences of the resistance of manganite in the absence of magnetic field (1) and in the magnetic field (2) with an induction of 0.92 T

Вблизи T_C на зависимости $R(T)$, измеренной в магнитном поле, наблюдается «излом», соответствующий максимуму модуля магнитосопротивления (рис. 4). Обычно $|MR|$ возрастает при понижении температуры, что связывается с тунелированием спин-поляризованных носителей через границы зерен или неоднородностей [1], однако в исследованном манганите наблюдается спад $|MR|$. Этот эффект можно связать с перестройкой электронной зонной структуры при изменении состояния магнитной подсистемы манганита [11].

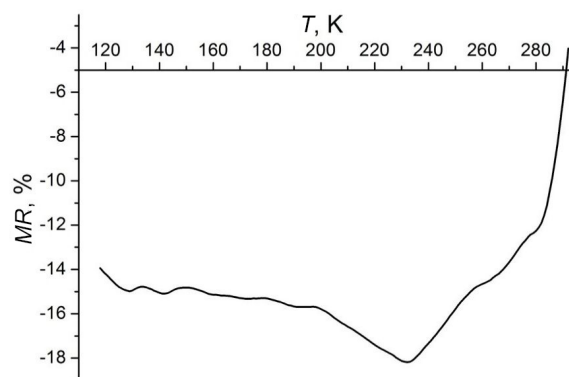


Рис. 4. Зависимость магнитосопротивления манганита от температуры

Fig. 4. Dependence of the magnetoresistance of manganite on the temperature

Графики зависимости сопротивления манганита от частоты в диапазоне от 100 Гц до 4 МГц, построенные при комнатной температуре для двух значений напряжения (4 и 6 В) приведены на рис. 5.

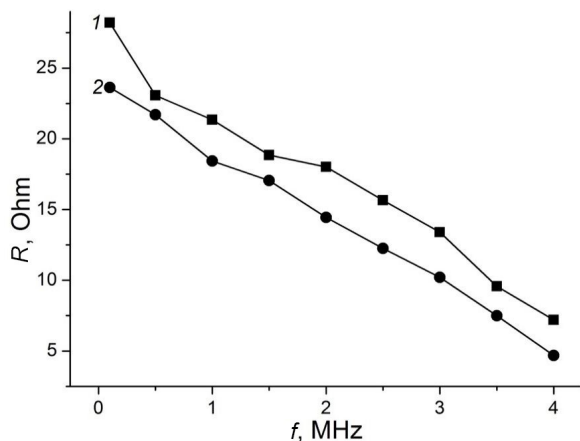


Рис. 5. Частотные зависимости сопротивления манганита при разных значениях измерительного напряжения: 1 – 4 В; 2 – 6 В

Fig. 5. Frequency dependences of the resistance of manganite at different measurement voltages: 1 – 4 V; 2 – 6 V

Построенные зависимости демонстрируют уменьшение сопротивления с ростом частоты, причем в области 1.5–2 МГц на графике 1 наблюдается слабая зависимость от частоты, приближающаяся к плато. В работе [12] четко выраженное плато проявляется на температурной зависимости проводимости манганита $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3$ на более низких частотах (100–300 кГц) и объясняется сменой прыжкового механизма переноса зарядов туннельной проводимостью. Далее вступает в действие перколяционный механизм переноса с образованием мезоскопической структуры перколяционных кластеров в фазово-расслоенном неоднородном манганите [12].

С повышением напряжения сопротивление манганита уменьшилось, что связано, очевидно, с его разогревом.

Заключение

1. Синтезирован однофазный керамический манганит $\text{La}_{0.625}\text{Sr}_{0.35}\text{Ce}_{0.025}\text{Mn}_{0.975}\text{Zn}_{0.025}\text{O}_3$, имеющий ромбоэдрическую кристаллическую структуру.

2. Намагниченность синтезированного манганита выше, а температура Кюри ниже, чем у манганита базового состава $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$. Значительная ширина температурного интервала перехода «ферромагнетик-парамагнетик» (около 45 К) свидетельствует о высокой неоднородности полученного манганита.

3. При температурах выше 285 К манганит проявляет свойства полупроводника. Модуль отрицательного магнитосопротивления достигает максимума (18%) при температуре 231 К.

4. С повышением частоты от 100 кГц до 4 МГц сопротивление манганита уменьшается с замедлением процесса спада в области 1.5–2 МГц. При повышении напряжения при измерениях сопротивление снижается за счет разогрева манганита протекающим током.

5. Полученные результаты объясняются экранированием ионов Mn^{4+} диамагнитными ионами цинка, образованием ионов Mn^{2+} , взаимосвязью зонной структуры с магнитной подсистемой манганита, фазовым расслоением и формированием кластеров разновалентных ионов, конкуренцией и сменой механизмов переноса зарядов (прыжкового, туннельного, перколяционного).

Список литературы/References

1. Salamon M. B., Jaime M. The physics of manganites: Structure and transport. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, vol. 73, no. 3, pp. 583–628. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.73.583>
2. Urushibara A., Moritomo Y., Arima T., Asamitsu A., Kido G., Tokura Y. Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. *Phys. Rev. B*, 1995, vol. 51, no. 2, pp. 14103–14109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.14103>
3. Abdel-Latif I. A. Rare earth manganites and their applications. *J. Phys.*, 2012, vol. 1, no. 3, pp. 15–31.
4. Karpasyuk V. K., Badelin A. G., Derzhavin I. M., Merkulov D. I., Smirnov A. M. Electromagnetic parameters of multicomponent manganites depending on combination and electronic configuration of substituents for manganese. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 42746–42749.
5. Karpasyuk V. K., Badelin A. G., Derzhavin I. M., Merkulov D. I. Systems of manganites with enhanced electromagnetic parameters. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2018, vol. 9, no. 5, pp. 807–812. <https://doi.org/10.1134/S2075113318050143>
6. Raychaudhuri P., Mitra C., Mann P. D. A., Wirth S. Phase diagram and Hall effect of the electron doped manganite $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{MnO}_3$. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, iss. 10, pp. 8328–8330. <https://doi.org/10.1063/1.1556976>
7. Mandal P., Hassen A., Loidl A. Effect of Ce doping on structural, magnetic, and transport properties of SrMnO_3 perovskite. *Phys. Rev. B*, 2004, vol. 69, pp. 224418–224423. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.224418>
8. Karpasyuk V. K., Badelin A. G., Datskaya Z. R., Merkulov D. I., Estemirova S. Kh. Properties of La-Sr manganites with combined substitution of different valence ions for strontium and manganese. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 201–206. <https://doi.org/10.1134/S2075113318020132>
9. Musaeva Z. R., Vybornov N. A., Karpasyuk V. K., Smirnov A. M., Uspenskaya L. S., Yzenkov S. Kh. Structural self-organization, domain structure, and magnetic characteristics of manganites of the La-Sr-Mn-Ti-Ni-O system. *J. Surf. Investig.*, 2007,



- vol. 1, no. 4, pp. 423–427. <https://doi.org/10.1134/S1027451007040118>
10. Kowalik M., Tokarz W., Kolodziejczyk A. Electronic band structures of $\text{La}_{2/3}\text{Pb}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}(\text{Fe,Co,Ni})_{1/3}\text{O}_3$. *Acta Phys. Pol. A*, 2015, vol. 127, no. 2, pp. 251–253. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.251>
11. Bebenin N. G., Zainullina R. I., Ustinov V. V. Colossal magnetoresistance manganites. *Phys. Usp.*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 719–738. <https://doi.org/10.3367/UfNe.2017.07.038180>
12. Hizi W., Rahmouni H., Khirouni K., Dhahri E. Consistency between theoretical conduction models and experimental conductivity measurements of strontium-doped lanthanum manganite. *J. Alloys Compd.*, 2023, vol. 957, art. 170418. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170418>
13. Lunkenheimer P., Mayr F., Loidl A. Dynamic conductivity from audio to optical frequencies of semiconducting manganites approaching the metal-insulator transition. *Ann. Phys.*, 2006, vol. 15, no. 7–8, pp. 498–507. <https://doi.org/10.1002/andp.200651807-806>
14. Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *J. Appl. Crystallogr.*, 1969, vol. 2, pp. 65–71. <https://doi.org/10.1107/S0021889869006558>
15. Larson A. C., Von Dreele R. B. General Structure Analysis System (GSAS). *Los Alamos National Laboratory Report*, 1994, pp. 86–748.
16. Abramovich A. I., Koroleva L. I., Michurin A. V. Peculiarities of magnetic, galvanomagnetic, elastic, and magnetoelastic properties of $\text{Sm}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ manganites. *J. Exp. Theor. Phys.*, 2002, vol. 95, no. 5, pp. 917–926. <https://doi.org/10.1134/1.1528684>
17. Shannon R. D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Cryst. A*, 1976, vol. 32, pp. 751–767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
18. Tan G., Chen Z., Zhang X. Anomalous magnetotransport in $\text{LaMn}_{1-x}\text{Te}_x\text{O}_3$. *Sci. China Ser. G-Phys. Mech. Astron.*, 2009, vol. 52, no. 7, pp. 987–992. <https://doi.org/10.1007/s11433-009-0134-x>

Поступила в редакцию 31.05.2024; одобрена после рецензирования 02.09.2024;
принята к публикации 03.10.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 31.05.2024; approved after reviewing 02.09.2024;
accepted for publication 03.10.2024; published 31.03.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 44–52

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 44–52

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-44-52>, EDN: IJAXHF

Научная статья
УДК 537.86.4



Влияние кристаллографической анизотропии ненасыщенной пленки железо-иттриевого граната на спиновую инжекцию в пленку платины по механизму обратного спинового эффекта Холла

С. Л. Высоцкий^{1,2}✉, М. Е. Селезнев^{1,2}, Г. М. Амаханов^{1,3}, Ю. В. Никулин^{1,2}

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

³Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Высоцкий Сергей Львович, кандидат физико-математических наук, ¹ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники, ²доцент кафедры технологии материалов, vysoctsl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3151-9297>, AuthorID: 27015

Селезнев Михаил Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, ¹научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники, ²доцент кафедры технологии материалов, mixanich94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7359-3201>, AuthorID: 1031873

Амаханов Гайдар Маликович, ¹инженер лаборатории магнитоэлектроники; ³студент, agm.05@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-9998-3384>

Никулин Юрий Васильевич, кандидат физико-математических наук, ¹старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники; ²доцент кафедры технологии материалов, yvnikuln@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2957-5468>, AuthorID: 168029

Аннотация. Исследована генерация тока носителей заряда в пленках платины, нанесенных на поверхность ферритовых волноводов, изготовленных из пленок железо-иттриевого граната кристаллографических ориентаций (100) и (111). Из каждой пленки вырезалось по два волновода, короткие стороны которых ориентировались в направлении осей трудного и легкого намагничивания. Спиновые волны возбуждались в полученных структурах в геометрии поверхностных магнитоэлектрических волн при величинах поля подмагничивания, не обеспечивающих намагничивания пленок железо-иттриевого граната до насыщения. Показано, что для обеих кристаллографических ориентаций генерация тока носителей заряда наиболее эффективно происходит при направлении внешнего магнитного поля вдоль оси легкого намагничивания в условиях формирования в пленке феррита симметричной полосовой доменной структуры.

Ключевые слова: железо-иттриевый гранат, спиновые волны, кристаллографическая анизотропия, магнитные домены, обратный спиновый эффект Холла

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00640).

Для цитирования: Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Амаханов Г. М., Никулин Ю. В. Влияние кристаллографической анизотропии ненасыщенной пленки железо-иттриевого граната на спиновую инжекцию в пленку платины по механизму обратного спинового эффекта Холла // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 44–52. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-44-52>, EDN: IJAXHF

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Influence of crystallographic anisotropy of unsaturated yttrium iron garnet film on spin injection in platinum film by the mechanism of inverse spin Hall effect

S. L. Vysotskii^{1,2}✉, M. E. Seleznev^{1,2}, G. M. Amakhanov^{1,3}, Yu. V. Nikulin^{1,2}

¹Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia

²Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

³Yury Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

Sergei L. Vysotskii, vysoctsl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3151-9297>, AuthorID: 27015

Mikhail E. Seleznev, mixanich94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7359-3201>, AuthorID: 1031873

Gaidar M. Amakhanov, agm.05@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-9998-3384>

Yury V. Nikulin, yvnikuln@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2957-5468>, AuthorID: 168029

© Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Амаханов Г. М.,
Никулин Ю. В., 2025



Abstract. Background and Objectives: Thin-film structures of yttrium iron garnet ferrite film – platinum are actively studied due to the possibility of using the direct (for converting electric current in platinum into spin waves in ferrite) and inverse (injection of spin current from ferrite into platinum film) spin Hall effects for application in magnonics and spintronics devices. **Materials and Methods:** The structures studied in this work were obtained on the basis of yttrium iron garnet films of crystallographic orientations (100) and (111), from which waveguides were cut out, in which spin waves were excited. Their propagation was monitored using a vector network analyzer. A platinum film in the form of stripe oriented along the long axis of the waveguide was fabricated on the surface of the waveguides using magnetron sputtering, photolithography, and ion etching. Spin injection from ferrite film in the platinum film results in electric charge current generation. An experimentally measured value was the electromotive force between contacts to the platinum stripe. It was measured using a synchronous detector. The measurements were carried out at magnetization field values lower than the saturation field of the ferrite film, with the magnetic structure of the film being divided into domains. **Results and Conclusions:** It has been shown that for both crystallographic orientations the maximum spin injection is achieved when magnetizing the waveguides along the easy magnetization axis and symmetrical domain structure is formed.

Keywords: yttrium iron garnet, spin waves, crystallographic anisotropy, magnetic domains, inverse spin Hall effect

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-29-00640).

For citation: Vysotskii S. L., Seleznev M. E., Amakhanov G. M., Nikulin Yu. V. Influence of crystallographic anisotropy of unsaturated yttrium iron garnet film on spin injection in platinum film by the mechanism of inverse spin Hall effect. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 44–52 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-44-52>, EDN: IJAXHF

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Эффекты взаимного преобразования спинового тока и тока носителей заряда в слоистых структурах «феррит – тяжелый металл» активно исследуются на протяжении более двух десятилетий [1–13], поскольку с их использованием связывается возможность построения устройств магноники и спинтроники. Наиболее часто исследуются структуры, состоящие из пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ), являющегося лучшей средой для исследования спин-волновых возбуждений, и платины. В данной работе рассматривается обратный спиновый эффект Холла (ОСЭХ), заключающийся в том, что в структуре ЖИГ-платина при наличии в пленке ЖИГ спин-волновых возбуждений (как резонансного характера, так и распространяющихся волн) в пленке платины генерируется ток носителей заряда

$$\vec{I}_e \propto |I_{s,n}| \cdot [\vec{n} \times \vec{m}],$$

где \vec{n} и \vec{m} – единичные векторы вдоль нормали к поверхности пленки ЖИГ и намагниченности, $I_{s,n}$ – компонента спинового тока вдоль нормали \vec{n} . Наиболее часто ОСЭХ исследуется при величинах поля подмагничивания H , достаточных как для намагничивания пленки ЖИГ до насыщения, так и для запрета развития процессов ЗМ параметрической неустойчивости [14]. При уменьшении магнитного поля H до величин $H < H_s$, где H_s – поле насыщения, в пленке ЖИГ формируются доменные структуры (ДС), при этом в [15] показана возможность наблюдения ОСЭХ для поддерживаемых доменной структурой спин-волновых возбуждений, обусловленных синфазными и противофазными колебаниями намагниченности в доменах, а также волнами смещения доменных границ [16–19].

Следует отметить, что исследование ОСЭХ в структурах ЖИГ-платина, как правило, ведется с использованием пленок ЖИГ, эпитаксиально выращенных на подложках из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) кристаллографической ориентации (111). Для таких пленок при величинах поля подмагничивания больше поля насыщения при фиксированной величине H положение спектра поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) [20] практически не зависит от направления H относительно кристаллографических осей пленки [21]. Особенности ОСЭХ при использовании в качестве подложки ГГГ (100) рассматривались в [22]. В этом случае в плоскости пленки можно выделить оси трудного [100] и «полулегкого» намагничивания [110]. Изменение направления намагничивания пленки относительно этих осей приводит к сдвигу спектра исследованных в работе ПМСВ и, соответственно, влияет на диапазон частот, в котором наблюдается генерация ЭДС.

В данной работе исследуется зависимость эффекта ОСЭХ в структурах ЖИГ(100)-платина и ЖИГ(111)-платина от направления поля намагничивания относительно кристаллографических осей структуры в малых полях подмагничивания.

1. Исследуемые структуры и методика эксперимента

Исследовались структуры, полученные на основе пленок ЖИГ кристаллографических ориентаций (100) толщиной 16.1 мкм и (111) толщиной 15.6 мкм с намагниченностью насыщения 1750 Гс, в которых с помощью методики [23] были определены направления осей трудного и легкого намагничивания. Из обеих пленок были вырезаны волноводы с плоскостными размерами



10 x 5 мм, на поверхности которых с помощью технологий магнетронного напыления, фотолитографии и ионного травления были изготовлены ориентированные вдоль длинной стороны волновода полоски из платины толщиной 4 нм, длиной 4 мм, шириной 25 мкм; их сопротивление равнялось 11–12 кОм. Далее структуры на основе пленки (100) будем называть образцами № 1 и № 2, а на основе (111) – № 3 и № 4, при этом короткие оси волноводов (вдоль которых в эксперименте будет прикладываться поле подмагничивания H) образцов № 1 и № 3 соответствуют направлению оси трудного намагничивания (ОТН), а образцов № 2 и № 4 – направлению легкого намагничивания (ОЛН). На вставке к рис. 1 пунктиром показаны направления ОТН (НМЕ) в образцах № 1 и № 3 и ОЛН (ЕМЕ) в образцах № 2 и № 4. Там же показаны направления приложения магнитного поля \vec{H} и распространения спиновых волн \vec{q} .

Образцы устанавливались в макет линии задержки (ЛЗ) ПМСВ с микрополосковыми антеннами шириной 40 мкм с расстоянием между ними 7 мм, который размещался между полюсами электромагнита. Поле подмагничивания прикладывалось касательно к поверхности структуры перпендикулярно длинной оси волноводов. Контакты к полоске платины для измерения генерируемой ЭДС выполнялись с помощью токопроводящего клея. В процессе измерений доменная структура пленок ЖИГ могла наблюдаться с помощью поляризационного микроскопа.

На входную антенну от векторного анализатора цепей подавалась СВЧ мощность 7 дБм в режиме измерения ЭДС или –25 дБм для контроля области частот возбуждения СВ. Модуляция СВЧ мощности сигналом в виде меандра с частотой 11.3 кГц позволяла проводить измерение ЭДС с помощью синхронного детектора. Регистрировались частотные зависимости модуля коэффициента передачи спиновых волн $S_{12}(f)$ и ЭДС $U(f)$. Известно [14], что при распространении ПМСВ в структуре пленка ЖИГ – платина максимальная величина генерируемой ЭДС наблюдается на частотах, отвечающих длинноволновой f_0 и коротковолновой f_s границам спектра ПМСВ. Используемые в конструкции макета ЛЗ антенны не позволяют возбуждать коротковолновую часть спектра ПМСВ на частотах, близких к f_s . По этой причине при регистрации частотных зависимостей $U(f)$ будем ограничиваться областью частот вблизи частоты f_0 .

Подробное описание методики измерений приведено в [15].

2. Результаты измерений

На рис. 1, а и 1, б приведены частотные зависимости $S_{12}(f)$ (кривые 1–4) и ЭДС $U(f)$ (1^U – 4^U), соответственно, для случаев размещения в макете ЛЗ образцов № 1 – № 4 (номера кривых соответствуют номеру структуры) при намагничивании пленок ЖИГ до насыщения ($H = 940$ Ое). Видно, что длинноволновые (низкочастотные) границы спектра ПМСВ в образцах № 1 и № 2 (показаны на рисунке стрелками), намагниченных вдоль осей трудного (f_{01}) и легкого (f_{02}) намагничивания, соответственно, различаются примерно на 400 МГц, тогда как для образцов № 3 и № 4 f_{03} и f_{04} практически совпадают. Максимальные величины ЭДС U_{\max} вблизи f_0 помечены звездочками на зависимостях $U(f)$ (рис. 1, б) для всех образцов.

Рассмотрим зависимости от величины H длинноволновых границ спектра ПМСВ и U_{\max} для исследованных образцов. При этом, поскольку в ненасыщенной пленке ЖИГ в используемой в эксперименте геометрии ПМСВ характер распределения намагниченности по толщине пленки и в направлении распространения распространяющихся в ДС волн может отличаться от случая насыщенной пленки, будем называть распространяющиеся волны спин-волновыми возбуждениями (СВВ).

На рис. 2, а кривыми 1 и 2 представлены зависимости $f_0(H)$ для образцов № 1 и № 2, соответственно. Видно, что при намагничивании в направлении оси трудного намагничивания при уменьшении H до величин $H < 60$ Э характер зависимости меняется – при уменьшении H частота f_{01} растет (кривая 1 на рис. 2, а), при этом уровень регистрируемой ЭДС становится неразличимым на фоне шумов (см. кривую 1^U на рис. 2, б и вставку к нему).

В то же время, при приложении поля H вдоль оси легкого намагничивания частота f_{02} монотонно снижается при уменьшении H до 0 (кривая 2 на рис. 2, а), а зависимость $U(H)$ демонстрирует генерацию ЭДС во всем интервале величин H , отвечающих ненасыщенному состоянию пленки ЖИГ (кривая 2^U на рис. 2, б и вставка к нему), при этом для $H \approx 10$ Э наблюдается ярко выраженный максимум.

На рис. 3, а приведено изображение доменной структуры для образца № 1, которая становится различимой при уменьшении H до пример-

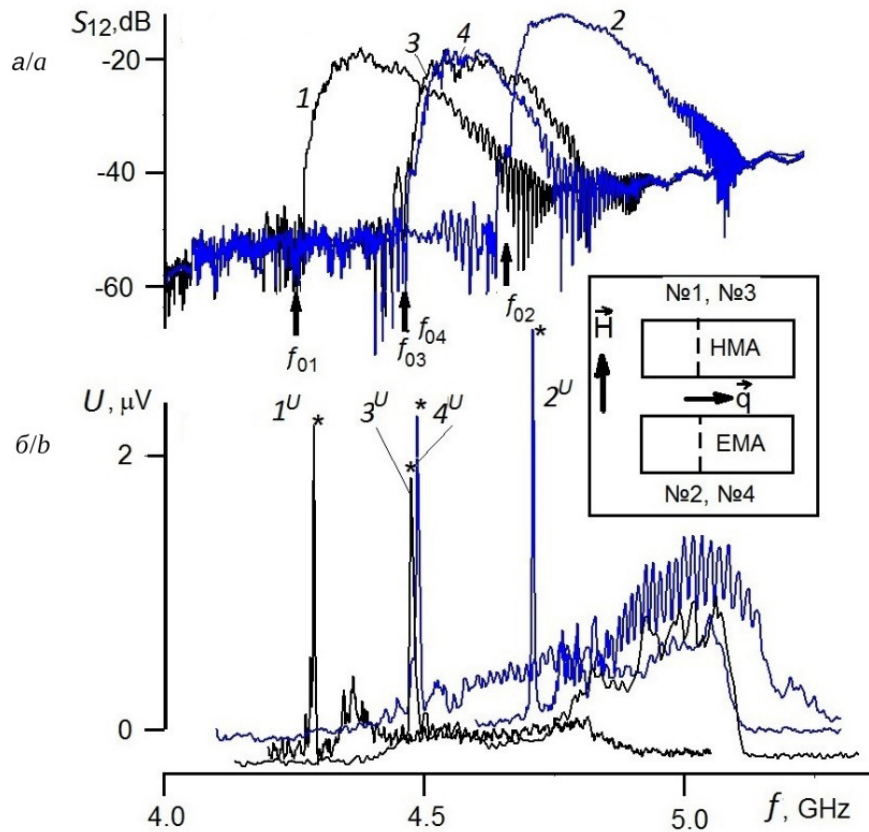


Рис. 1. Частотные зависимости $S_{12}(f)$ (кривые 1–4 на рис. 1, а) и ЭДС $U(f)$ (1^U – 4^U) (кривые на рис. 1, б) при намагничивании пленок ЖИГ до насыщения ($H = 940$ Э) (цвет онлайн)

Fig. 1. Frequency dependences of $S_{12}(f)$ (curves 1–4 in Fig. 1, а) and EMF $U(f)$ (1^U – 4^U) in Fig. 1, б) at $H = 940$ Oe (saturated YIG film) (color online)

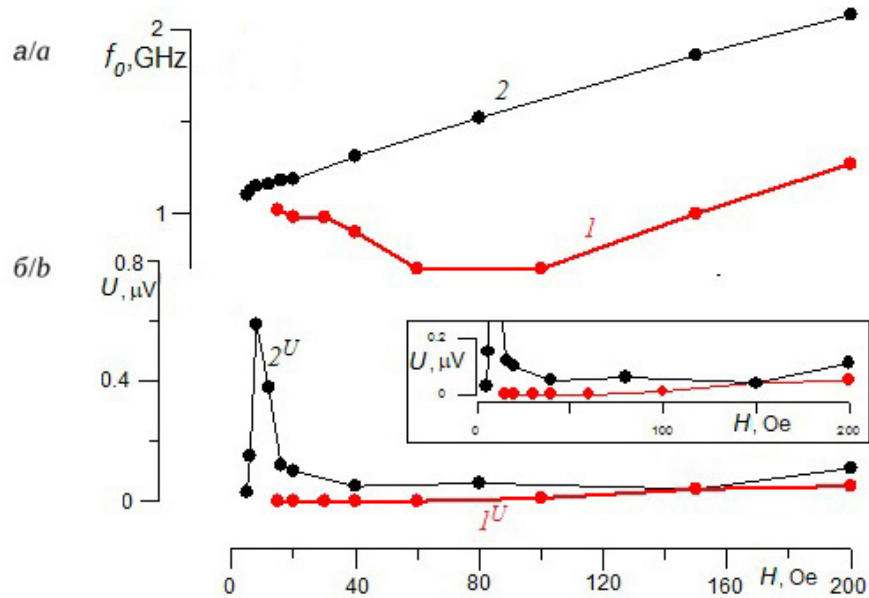


Рис. 2. Зависимости $f_0(H)$ для СВВ образцов № 1 (кривая 1) и № 2 (кривая 2) (а); зависимости $U(H)$ для образцов № 1 (кривая 1^U) и № 2 (кривая 2^U) (б) (цвет онлайн)

Fig. 2. Dependences $f_0(H)$ for SWE of samples no. 1 (curve 1) and no. 2 (curve 2) (а); dependences $U(H)$ for samples no. 1 (curve 1^U) and no. 2 (curve 2^U) (б) (color online)



но 50 Э. Видно, что она является симметричной (отношение ширин «светлого» и «темного» доменов $t \approx 1$) полосовой с периодом $\Lambda \approx 4$ мкм (ширина темной горизонтальной полосы (платины) равна 25 мкм может использоваться как масштабная метка). При этом, несмотря на то, что внешнее поле H направлено вдоль оси трудного намагничивания (НМА), домены ориентированы вдоль оси легкого намагничивания (ЕМА) в пленке ЖИГ. Такая ориентация сохраняется при уменьшении H до 15 Э (рис. 3, б), после чего сигнал СВВ не наблюдается. Из сопоставления кривых I^U на рис. 2, б и рис. 3, а можно заключить, что в структуре № 1 при величинах H , отвечающих формированию в пленке ЖИГ доменной структуры, ОСЭХ не наблюдается. В свою очередь, в структуре № 2 с момента начала наблюдения при $H \approx 50$ Э (рис. 3, в) и до $H = 0$ (рис. 3, г) домены остаются ориентированными вдоль ОЛН, при этом генерация ЭДС наблюдается во всем исследованном интервале величин H .

Рассмотрим теперь аналогичные зависимости для образцов № 3 и № 4, полученных на основе пленки ЖИГ(111). На рис. 4, а приведена зависимость $f_0(H)$ для структуры № 3 (намагни-

ченной в направлении ОТН), из которой следует, что при $H < 60$ Э область наблюдения ПМСВ с низкочастотной границей f_{03} (кривая 3) разделяется на две области наблюдения доменных СВВ – противофазное и синфазное с низкочастотными границами, показанными на рис. 4, а кривыми 3₁ и 3₂ соответственно. Эти СВВ регистрируются при уменьшении величины H до 50 и 40 Э соответственно. При дальнейшем уменьшении H СВВ отсутствуют до $H \approx 26$ Э, когда формируется и наблюдается до $H \approx 3$ Э СВВ, обусловленное колебаниями доменных границ, с низкочастотной границей, показанной на рис. 4, а кривой 3₃. Из рис. 4, б видно, что для всех описанных видов СВВ наблюдается генерация ЭДС.

В случае образца № 4 (намагниченного в направлении оси легкого намагничивания) вид исследуемых зависимостей качественно не изменяется (см. рис. 4, в), однако интервал величин H наблюдения противофазных СВВ расширяется до 26 Э, синфазных – до 40 Э, а для СВВ, обусловленного колебаниями доменных границ, не изменяется. Вид соответствующих зависимостей $U(H)$ показан на рис. 4, г. Из сравнения рис. 4, б и 4, г видно, что в структуре № 4 уровень

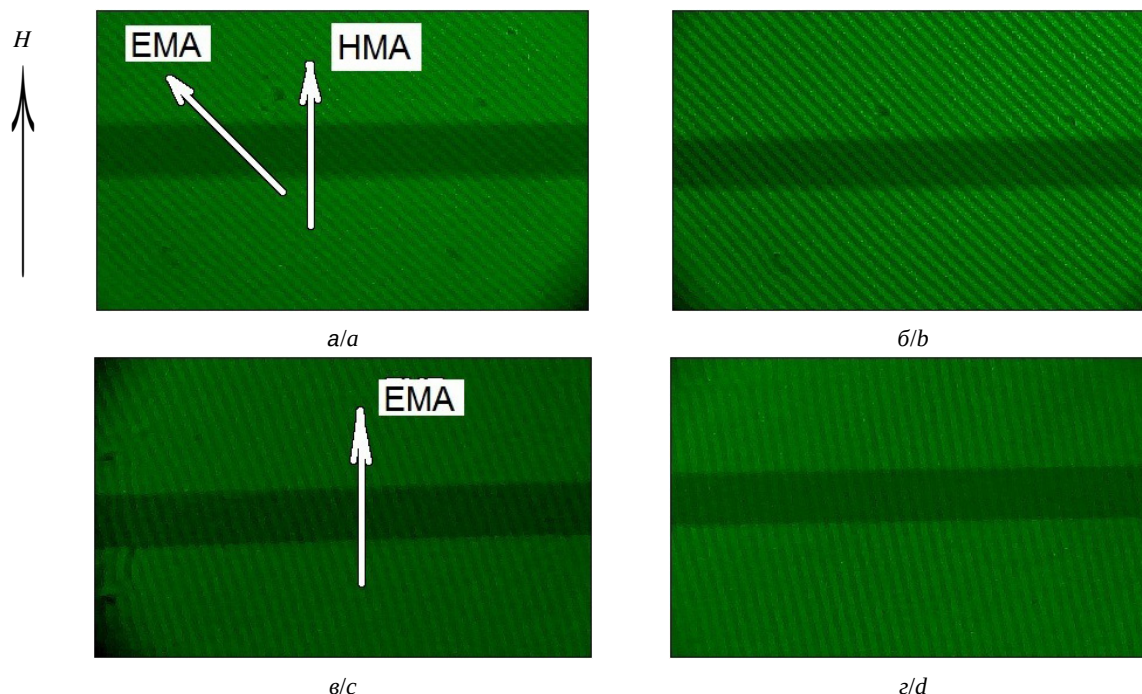


Рис. 3. Вид доменных структур в образце № 1 при $H \approx 50$ Э (а) и $H \approx 15$ Э (б) и в образце № 2 при $H \approx 50$ Э (в) и $H \approx 0$ (г). Темная горизонтальная линия (полоска платины шириной 25 мкм) может быть использована как масштабная метка (цвет онлайн)

Fig. 3. View of domain structures in sample no. 1 at $H \approx 50$ Oe (a) and $H \approx 15$ Oe (b) and in sample no. 2 at $H \approx 50$ Oe (c) and $H \approx 0$ (d). The dark horizontal line (platinum strip 25 μm wide) can be used as a scale mark (color online)

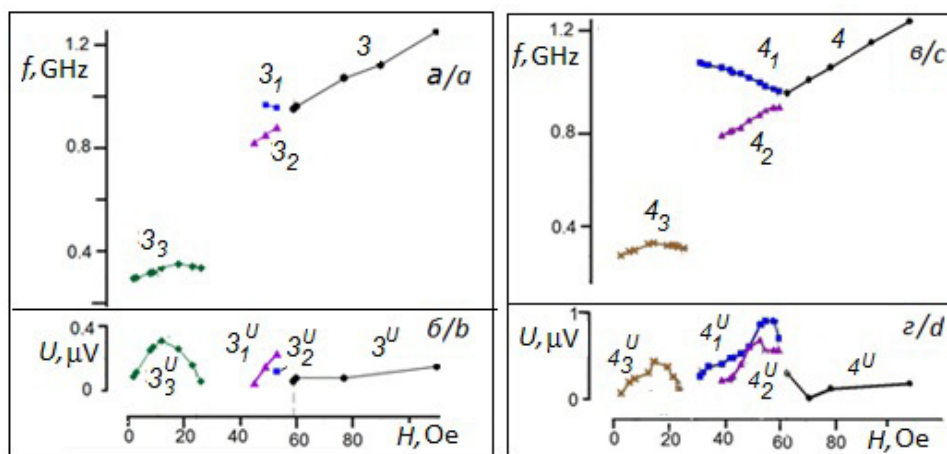


Рис. 4. Зависимости $f_0(H)$ для СВВ образца № 3 (кривые 3, 3_1 , 3_2 , 3_3) (а); зависимости $U(H)$ для СВВ образца № 3 (кривые 3^U , 3_1^U , 3_2^U , 3_3^U) (б); зависимости $f_0(H)$ для СВВ образца № 4 (кривые 4, 4_1 , 4_2 , 4_3) (в); зависимости $U(H)$ для СВВ образца № 4 (кривые 4^U , 4_1^U , 4_2^U , 4_3^U) (г) (цвет онлайн)

Fig. 4. Dependences $f_0(H)$ for SWE of sample no. 3 (curves 3, 3_1 , 3_2 , 3_3) (a); dependences $U(H)$ for SWE sample no. 3 (curves 3^U , 3_1^U , 3_2^U , 3_3^U) (b); dependences $f_0(H)$ for SWE sample no. 4 (curves 4, 4_1 , 4_2 , 4_3) (c); dependences $U(H)$ for SWE sample no. 4 (curves 4^U , 4_1^U , 4_2^U , 4_3^U) (d) (color online)

регистрируемой ЭДС в несколько раз выше, чем для структуры № 3.

На рис. 5 представлены изображения ДС структур № 3 и № 4 для нескольких величин H . Для образца № 3 различить ДС можно было при уменьшении H до величин, меньших 58 Э, при этом период ДС составлял $\Lambda \approx 29$ мкм, а сама она имела вид полосовой несимметричной с параметром $t \approx 9$ (см. рис. 5, а для $H \approx 38$ Э). С уменьшением H величины Λ и t уменьшались (см. рис. 5 для $H \approx 25$ Э) при со-

хранении полосового характера ДС, достигая $\Lambda \approx 11$ мкм и $t \approx 1$, соответственно, при $H \approx 22$ Э. В интервале 22–11 Э наблюдалась блочная зигзагообразная структура ДС, где оси доменов ориентировались вдоль какой-либо из осей легкого намагничивания, при этом величина t сохранялась равной 1 при $\Lambda \approx 10$ мкм (рис. 5, в). При $H < 16$ Э ДС принимала характер симметричной полосовой с периодом $\Lambda \approx 10$ мкм, которая сохранялась до $H = 0$ (рис. 5, г). Из сопоставления рис. 4, б и 5, в, г следует, что наиболее эффек-

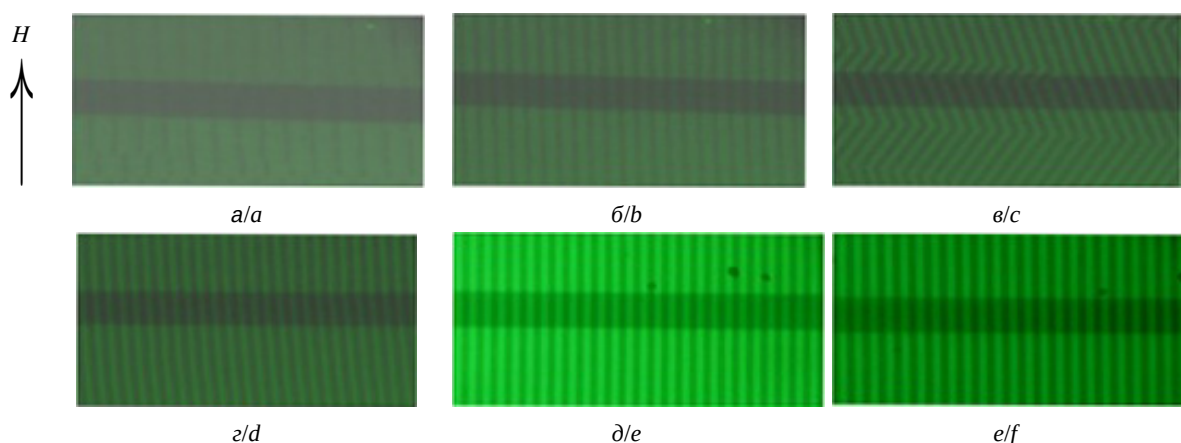


Рис. 5. Вид доменных структур в образце № 3 при $H \approx 38$ Э (а), $H \approx 25$ Э (б), $H \approx 18$ Э (в), $H \approx 5$ Э (г) и в образце № 2 при $H \approx 40$ Э (д) и $H \approx 5$ Э (е). Темная горизонтальная линия (полоска платины шириной 25 мкм) может быть использована как масштабная метка (цвет онлайн)

Fig. 5. View of domain structures in sample no. 3 at $H \approx 38$ Oe (a), $H \approx 25$ Oe (b), $H \approx 18$ Oe (c), $H \approx 5$ Oe (d) and in sample no. 2 at $H \approx 40$ Oe (e) and at $H \approx 5$ Oe (f). The dark horizontal line (platinum strip 25 μm wide) can be used as a scale mark (color online)



тивно в структуре № 3 ЭДС генерируется, когда доменная структура принимает вид полосовой симметричной.

Для образца № 4 ДС при уменьшении H до $H \approx 50$ Э регистрировалась симметричная полосовая структура с периодом $\Lambda \approx 11$ мкм, $t \approx 1$ (рис. 5, д). Такой вид ДС сохранялся при уменьшении H до 0 (рис. 5, е). Максимальная величина ЭДС наблюдалась для протофазного СВВ при $H \approx 56$ Э.

Заключение

С использованием пленок ЖИГ кристаллографической ориентации (100) и (111) экспериментально исследован обратный спиновый эффект Холла в образцах «пленка феррита – пленка платины» в условиях разбиения магнитной структуры пленки ЖИГ на домены. Показано, что при направлении внешнего магнитного поля вдоль оси легкого намагничивания пленок ЖИГ и формировании в пленке ЖИГ симметричной полосовой доменной структуры генерируемая в пленке платины ЭДС может в несколько раз превышать аналогичную величину, регистрируемую при намагничивании структуры вдоль оси трудного намагничивания.

Список литературы

1. Dyakonov M. I., Perel V. I. Current induced spin orientation of electrons in semiconductors // *Phys. Lett. A*. 1971. Vol. 35, № 6. P. 459–460. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(71\)90196-4](https://doi.org/10.1016/0375-9601(71)90196-4)
2. Sandweg C. W., Kajiwara Y., Ando K., Saitoh E., Hillebrands B. Enhancement of the spin pumping efficiency by spin wave mode selection // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, № 25. Art. 252504. <https://doi.org/10.1063/1.3528207>
3. Yang F., Hammel P. C. FMR-driven spin pumping in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -based structures // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018. Vol. 51, № 25. Art. 253001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aac249>
4. Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y., Ioan-Lucian P., Dieny B., Pirro P., Hillebrands B. Review on spintronics: Principles and device applications // *JMMM*. 2020. Vol. 509, № 12. Art. 166711. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166711>
5. Manuilov S. A., Du C., Adur R., Wang H. L., Bhallamudi V., Yang F., Hammel P. C. Spin pumping from spinwaves in thin film YIG // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, № 4. Art. 042405. <https://doi.org/10.1063/1.4927451>
6. Chumak A. V., Serga A. A., Jungfleisch M. B., Neb R., Bozhko D. A., Tiberkevich V. S., Hillebrands B. Direct detection of magnon spin transport by the inverse spin Hall effect // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100, № 8. Art. 082405. <https://doi.org/10.1063/1.3689787>
7. Jungfleisch M. B., Chumak A. V., Kehlberger A., Lauer V., Kim D. H., Onbasli M. C., Ross C. A., Klaui M., Hillebrands B. Thickness and power dependence of the spin-pumping eject in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ heterostructures measured by the inverse spin Hall effect // *Phys. Rev. B*. 2015. Vol. 91, № 13. Art. 134407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.134407>
8. Kohno R., Thiéry N. M., An K., Noël P., Vila L., Naletov V. V., Beaulieu N., Youssef J. D., Loubens G., Klein O. Enhancement of YIG/Pt spin conductance by local Joule annealing // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 118, № 3. Art. 032404. <https://doi.org/10.1063/5.0028664>
9. Wang J., Wang H., Chen J., Legrand W., Chen P., Sheng L., Xia J., Lan G., Zhang Y., Yuan R., Dong J., Han X., Ansermet J. P., Yu H. Broad-wave-vector spin pumping of flat-band magnons // *Phys. Rev. Appl.* 2024. Vol. 21, № 4. Art. 044024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.044024>
10. Serha R. O., Bozhko D. A., Agrawal M., Verba R. V., Kostylev M., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Serga A. A. Low-Damping Spin-Wave Transmission in YIG/Pt-Interfaced Structures // *Adv. Mater. Interfaces*. 2022. Vol. 9, iss. 36. Art. 2201323. <https://doi.org/10.1002/admi.202201323>
11. Zhao Y., Yao Y., Chai Y., Zhou Z., Li Y., Guo Y., Lu Q., Liu H., Yang G., Dong G., Peng B., Hu Z., Liu M. Greatly Improved the Tunable Amplitude of Ferromagnetism Based on Interface Effect of Flexible Pt/YIG Heterojunctions // *ACS Appl Mater Interfaces*. 2024 Vol. 16, iss. 8. P. 10953–10959. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c17220>
12. Lobanov N., Matveev O., Morozova M. Bragg Resonances in a Yttrium Iron Garnet–Platinum–Yttrium Iron Garnet Layered Structure // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024. Vol. 88, iss. 2. P. 254–259. <https://doi.org/10.1134/S1062873823705330>
13. Yang M., Sun L., Zeng Y., Cheng J., He K., Yang X., Wang Z., Yu L., Niu H., Ji T., Chen G., Miao B., Wang X., Ding H. Highly efficient field-free switching of perpendicular yttrium iron garnet with collinear spin current // *Nat. Commun.* 2024. Vol. 15. Art. 3201. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47577-x>
14. Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А. Влияние параметрической неустойчивости на спиновую накачку дипольно-обменными поверхностными магнитостатическими волнами в структурах ЖИГ–Pt // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2023. Т. 31, № 2. С. 225–242. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003032>
15. Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Амаханов Г. М., Темиряев А. Г. Детектирование спин-волновых возбуждений доменной структуры в пленке железо-иттриевого граната с помощью обратного спинового эффекта Холла // *ФТТ*. 2024. Т. 66, № 7. С. 1057–1061. <https://doi.org/10.61011/FTT.2024.07.58373.34NN>
16. Вызулин С. А., Киров С. А., Сырьев Н. Е. Волны смещений доменных границ в ферритовой пластинке // *Радиотехника и электроника*. 1985. Т. 30, № 1. С. 179–181.



17. Stancil D. D. A magnetostatic wave model for domain wall collective excitation // *J. Appl. Phys.* 1984. Vol. 56, iss. 6. P. 1775–1779. <https://doi.org/10.1063/1.334184>
18. Ramesh M., Jedryka E., Wigen P. E., Shone M. Coupled oscillations of domain-domain wall system in garnet films // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 57, iss. 8. P. 3701–3703. <https://doi.org/10.1063/1.334995>
19. Киров С. А., Пильщиков А. И., Сырьев Н. Е. Магнитостатические типы колебаний в образце с доменной структурой // *ФТТ*. 1974. Т. 16, № 10. С. 3051–3056.
20. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М. : Физматлит, 1994. 464 с.
21. Берегов А. С., Кудинов Е. В. Магнитостатические волны в произвольно ориентированной пленке кубического ферромагнетика с наведенной анизотропией. Ч. II. Дисперсионные характеристики магнитостатических волн // *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*. 1987. № 6 (400). С. 8–12.
22. Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Сахаров В. К., Амаханов Г. М. Спиновая накачка ПМСВ, бегущими в направлениях «легкая» и «трудная» оси намагничивания, в микроструктурах ЖИГ/Pt // XXV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» : сб. докладов : в 2 т. Москва, 1–6 июля 2024 г. М. : РТУ МИРЭА, 2024. Т. 1. С. 454–459.
23. Высоцкий С. Л., Казаков Г. Т., Филимонов Ю. А., Шеин И. В., Хе А. С. Магнитостатические волны в косонамагниченной структуре с двумя ферритовыми слоями ориентации (111) // *Радиотехника и электроника*. 1990. Т. 35, № 5. С. 959–965.
7. Jungfleisch M. B., Chumak A. V., Kehlberger A., Lauer V., Kim D. H., Onbasli M. C., Ross C. A., Klaui M., Hillebrands B. Thickness and power dependence of the spin-pumping eject in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ heterostructures measured by the inverse spin Hall effect. *Phys. Rev. B*, 2015, vol. 91, no. 13, art. 134407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.134407>
8. Kohno R., Thiéry N. M., An K., Noël P., Vila L., Naleto V. V., Beaulieu N., Youssef J. D., Loubens G., Klein O. Enhancement of YIG/Pt spin conductance by local Joule annealing. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, vol. 118, no. 3, art. 032404. <https://doi.org/10.1063/5.0028664>
9. Wang J., Wang H., Chen J., Legrand W., Chen P., Sheng L., Xia J., Lan G., Zhang Y., Yuan R., Dong J., Han X., Ansermet J. P., Yu H. Broad-wave-vector spin pumping of flat-band magnons. *Phys. Rev. Appl.*, 2024, vol. 21, art. 044024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.044024>
10. Serha R. O., Bozhko D. A., Agrawal M., Verba R. V., Kostylev M., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Serga A. A. Low-Damping Spin-Wave Transmission in YIG/Pt-Interfaced Structures. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, vol. 9, iss. 36, art. 2201323. <https://doi.org/10.1002/admi.202201323>
11. Zhao Y., Yao Y., Chai Y., Zhou Z., Li Y., Guo Y., Lu Q., Liu H., Yang G., Dong G., Peng B., Hu Z., Liu M. Greatly Improved the Tunable Amplitude of Ferromagnetism Based on Interface Effect of Flexible Pt/YIG Heterojunctions. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, vol. 16, iss. 8, pp. 10953–10959. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c17220>
12. Lobanov N., Matveev O., Morozova M. Bragg Resonances in a Yttrium Iron Garnet–Platinum–Yttrium Iron Garnet Layered Structure. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2024, vol. 88, iss. 2, P. 254–259. <https://doi.org/10.1134/S1062873823705330>
13. Yang M., Sun L., Zeng Y., Cheng J., He K., Yang X., Wang Z., Yu L., Niu H., Ji T., Chen G., Miao B., Wang X., Ding H. Highly efficient field-free switching of perpendicular yttrium iron garnet with collinear spin current. *Nat. Commun.*, 2024, vol. 15, art. 3201. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47577-x>
14. Seleznev M. E., Nikulin Y. V., Khivintsev Y. V., Vysotskii S. L., Kozhevnikov A. V., Sakharov V. K., Dudko G. M., Pavlov E. S., Filimonov Y. A. Influence of three-magnon decays on electromotive force generation by magnetostatic surface waves in integral YIG-Pt structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2023, vol. 31, no. 2, pp. 225–248. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003032>
15. Vysotskii S. L., Seleznev M. E., Nikulin Yu. V., Kozhevnikov A. V., Amakhanov G. M., Temirazyev A. G. Detection of spin-wave excitations of domain structure in yttrium-iron film using inverse spin Hall effect. *Fizika Tverdogo Tela*, 2024, vol. 66, no. 7, pp. 1057–1061 (in Russian). <https://doi.org/10.61011/FTT.2024.07.58373.34HH>
16. Vizulin S. A., Kirov S. A., Siryev N. E. Domains wall displacement waves in ferrite plate. *Radiotekhnika i Elektronika*, 1985, vol. 30, no. 1, pp. 179–181 (in Russian).

References



17. Stancil D. D. A magnetostatic wave model for domain wall collective excitation. *J. Appl. Phys.*, 1984, vol. 56, no. 6, pp. 1775–1779. <https://doi.org/10.1063/1.334184>
18. Ramesh M., Jedryka E., Wigen P. E., Shone M. Coupled oscillations of domain – domain wall system in garnet films. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 57, no. 1, pp. 3701–3703. <https://doi.org/10.1063/1.334995>
19. Kirov S. A., Pilshikov S. A., Siryev N. E. Magnetostatic types of oscillations in sample with domain structure. *Physika Tverdogo Tela*, 1974, vol. 16, no. 1, pp. 3051–3056 (in Russian).
20. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnetization oscillations and waves*. London, CRC Press, 1996. 464 p. <https://doi.org/10.1201/9780138748487>
21. Beregov A. S., Kudinov E. V. Magnetostatic waves in arbitrary oriented film of cubic ferromagnetic with induced anisotropy. Part II. Dispersion characteristics of magnetostatic waves. *Electronic Technique. Ser. Microwave Electronics*, 1987, no. 6 (400), pp. 8–12 (in Russian).
22. Seleznev M. E., Nikulin Yu. V., Sakharov V. K., Amakhanov G. M. Spin pumping by MSSW propagating along “easy” and “hard” magnetization axes in microstructures YIG/Pt. *XXV International Conference “New in Magnetism and Magnetic Materials”: Collection of reports: in 2 vols. Moscow, July 1–6, 2024*. Moscow, RTU MIREA Publ., 2024, vol. 1, pp. 454–459.
23. Vysotskii S. L., Kazakov G. T., Filimonov Yu. A., Shein I. V., He A. S. Magnetostatic waves in obliquely magnetized structure consist of two ferrite layers of (111) orientation. *Radiotekhnika i Elektronika*, 1990, vol. 35, no. 5, pp. 959–965 (in Russian).

Поступила в редакцию 13.09.2024; одобрена после рецензирования 08.10.2024;
принята к публикации 16.10.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 13.09.2024; approved after reviewing 08.10.2024;
accepted for publication 16.10.2024; published 31.03.2025



БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 53–66
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 53–66
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-53-66>, EDN: KUJMJF

Научная статья
УДК 616-072.7:612.13

Проявление вено-артериального рефлекса, вызванного изменением положения руки, при измерениях микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии

Ан. В. Скрипаль^{1✉}, Д. Г. Верхов¹, Фракад Аль-Бадри¹, К. В. Машков¹, А. Д. Усанов¹,
А. А. Сагайдачный¹, В. А. Клочков²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, AuthorID: 33340

Верхов Дмитрий Геннадиевич, ассистент кафедры медицинской физики, werchowdg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9943-8376>, AuthorID: 682390

Аль-Бадри Фракад, аспирант кафедры медицинской физики, farqad@uowasit.edu.iq, <https://orcid.org/0009-0009-9411-1740>, AuthorID: 1222944

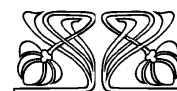
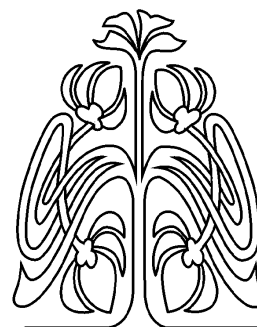
Машков Константин Владимирович, аспирант кафедры медицинской физики, konstantinpluss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5835-9428>, AuthorID: 1214916

Усанов Андрей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, aka_norton@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4004-875X>, AuthorID: 110433

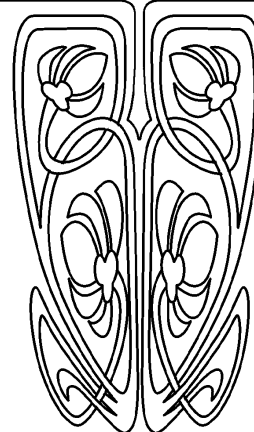
Сагайдачный Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, andsag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5296-1968>, AuthorID: 612410

Клочков Виктор Александрович, доктор медицинских наук, профессор кафедры пропедевтики внутренних болезней, v-klochkov1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7076-4610>, AuthorID: 559773

Аннотация. В системе регуляции кровообращения важным элементом является вено-артериальный рефлекс. Особенно выражено он проявляется в нижних конечностях (по сравнению с верхними конечностями) из-за большего трансмурального давления в артериях и венах ног. При проведении проб с изменением положения руки обычно проверяют сосудистую реакцию на повышение артериального давления при опускании ноги или руки ниже уровня сердца. В предложенной нами пробе исследовалась сосудистая реакция как на понижение артериального давления, так и на ее повышение до исходного уровня. С помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии измерялся показатель микроциркуляции при проведении последовательности проб с изменением положения руки по набору параметров, характеризующих динамику циркуляции крови в микрососудах пальца руки молодых и возрастных добровольцев. При поднимании руки показатель микроциркуляции в положении руки «вверх» у молодых добровольцев значительно уменьшался, в то время как в возрастной группе показатель микроциркуляции в положении руки «вверх» после резкого снижения имел тенденцию к увеличению. Такое значительное расхождение в реакции кровотока молодых и возрастных добровольцев нами соотнесено с проявлением вено-артериального рефлекса. Амплитуды нейрогенных и миогенных колебаний микрососудистого кровотока имели в основном разнонаправленный характер у разных возрастных групп.



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





Экспериментально измеренное увеличение кровенаполнения сосудов руки у возрастных добровольцев за счет появления колебаний кровотока в нейрогенном диапазоне объясняется реакцией симпатического отдела нервной системы, приводящей к проявлению веноуло-артериолярного рефлекса, который способствует восстановлению величины объемного кровенаполнения. В молодом возрасте веноуло-артериолярный рефлекс, вызванный изменением положения руки, может не проявляться. Тест с изменением положения конечности может дать ценную информацию о сохранности периферической иннервации микрососудов, что обосновывает перспективность использования данного теста при выявлении различных форм невропатий и возрастных особенностей регуляции кровотока.

Ключевые слова: веноуло-артериолярный рефлекс, микроциркуляция, функциональная проба, лазерная доплеровская флоуметрия, кровоснабжение конечности, вазоконстрикция, вазодилатация, миогенная реакция Бейлисса, гладкомышечные клетки, тонус сосудов

Для цитирования: Скрипаль Ан. В., Верхов Д. Г., Аль-Бадри Фарад, Машков К. В., Усанов А. Д., Сагайдачный А. А., Клочков В. А. Проявление веноуло-артериолярного рефлекса, вызванного изменением положения руки, при измерениях микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 53–66. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-53-66>, EDN: KUJMJJE

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

The appearance of the venuloarteriolar reflex during measurements microcirculation of blood by laser Doppler flowmetry caused by a change in the position of the hand

An. V. Skripal¹✉, D. G. Verkhov¹, Farqad Al-Badri¹, K. V. Mashkov¹, A. D. Usanov¹, A. A. Sagaidachnyi¹, V. A. Klochkov²

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 112 Bolshaya Kazachya St., Saratov 410012, Russia

Anatoly V. Skripal, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, AuthorID: 33340

Dmitry G. Verkhov, werchowdg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9943-8376>, AuthorID: 682390

Al-Badri Farqad, farqad@uowasit.edu.iq, <https://orcid.org/0009-0009-9411-1740>, AuthorID: 1222944

Konstantin V. Mashkov, konstantinpluss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5835-9428>, AuthorID: 1214916

Andrey D. Usanov, aka_norton@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4004-875X>, AuthorID: 110433

Andrey A. Sagaidachnyi, andsag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5296-1968>, AuthorID: 612410

Victor A. Klochkov, klochkov1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7076-4610>, AuthorID: 559773

Abstract. Background and Objectives: The venuloarteriolar reflex is a crucial part of the circulation regulation system, and it's particularly evident in the lower limbs compared to the upper limbs due to the higher transmural pressure in the arteries and veins of the legs. When testing with changes in arm position, vascular responses to increased blood pressure are usually checked by lowering the arm below heart level. The proposed sample examines the vascular response to both a decrease in blood pressure and an increase to its initial level. **Materials and Methods:** The study was conducted on two groups of volunteers, one of which included 7 healthy young people aged 21–28 years, who did not have a pronounced venuloarteriolar reflex during the exercise test, and the second 7 people aged 45–65 years, in whom the venuloarteriolar reflex was well expressed. Using the method of laser Doppler flowmetry we measured the microcirculation index during the sequence of tests with the change of the hand position according to the set of parameters characterising the dynamics of blood circulation in the microvessels of the finger. **Results:** When raising the arm, the microcirculation index in the “up” arm position in young volunteers has decreased significantly, while in the age group, the microcirculation index in the “up” arm position has tended to increase after a sharp decrease. We have defined such a significant discrepancy in the blood flow response of young and aged volunteers as an appearance of the venulo-arteriolar reflex. The amplitudes of neurogenic and myogenic fluctuations of microvascular blood flow were mainly multidirectional in different age groups. The experimentally measured increase in blood filling of the arm vessels in age-related volunteers, caused by the appearance of fluctuations in blood flow in the neurogenic range, is explained by the reaction of the sympathetic nervous system, leading to the appearance of the venulo-arteriolar reflex, which helps to restore the volume of blood filling. At a young age, the venulo-arteriolar reflex caused by a change in the position of the arm may not appear. **Conclusion:** The test with the change of limb position can provide valuable information on the preservation of peripheral innervation of microvessels, which justifies the prospect of using this test in the detection of various forms of neuropathies and age-related peculiarities of blood flow regulation.

Keywords: venuloarteriolar reflex, microcirculation, functional test, laser Doppler flowmetry, limb blood supply, vasoconstriction, vasodilation, Bayliss myogenic response, smooth muscle cells, regulation of arterial vessel tone

For citation: Skripal An. V., Verkhov D. G., Al-Badri Farqad, Mashkov K. V., Usanov A. D., Sagaidachnyi A. A., Klochkov V. A. The appearance of the venuloarteriolar reflex during measurements microcirculation of blood by laser Doppler flowmetry caused by a change in the position of the hand. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 53–66 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-53-66>, EDN: KUJMJJE

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)



Введение

Веноуло-артериолярный рефлекс (ВАР) является одним из механизмов регуляции кровотока на уровне микрососудов и может включать вклад как местных, так и центральных влияний в рамках сложной системы передачи физиологических сигналов [1, 2].

Известно, что веноуло-артериолярный рефлекс реализуется через взаимодействие сопряженных артериол и венул, и выполняет функцию предотвращения отека тканей [3]. Одним из механизмов реализации ВАР является констрикция артериол в ответ на увеличение напряжения сдвига и/или давления сопряженных венул, эндотелий которых вырабатывает оксид азота NO [4]. По другим данным, ВАР относят к местному симпатическому аксонному рефлексу [5]. Проведенные исследования ВАР демонстрируют, что любые изменения в веноулярном отделе микроциркуляторного русла, в том числе внутривенное введение вазоактивных веществ (норадреналина, ацетилхолина, аденозина, аденозинтрифосфата), отражаются на функциональном состоянии сопряженных питающих артериол. В ряде работ отмечается влияние симпатического отдела нервной системы на проявление ВАР [1, 6, 7].

Веноуло-артериолярный рефлекс особенно выраженно проявляется в нижних конечностях, по сравнению с верхними конечностями из-за большего значения трансмурального давления в артериях и венах ног [5]. Так, выявлено, что опускание ноги на 50 см ниже уровня сердца в положении лежа [1] или изменение положения тела с помощью наклонного стола [8] увеличивает венозное давление в ноге, что способствует включению в работу механизма ВАР и влечет за собой снижение перфузии в заданной конечности [9].

В работе [10] установлено, что при поднятии руки выше уровня сердца в 50% опытов регистрируется вазодилатация, при опускании руки ниже уровня сердца – в 35% случаев наблюдается вазоконстрикция. Показано, что в группе возрастных испытуемых опускание руки приводило к меньшему росту сосудистого сопротивления по сравнению с группой молодых [11]. Сделан вывод о том, что сосудистая реакция при опускании нижней конечности ниже уровня сердца обеспечивается взаимодействием миогенной и эндотелиальной регуляции, при этом не исключается наличие центральных нейрогенных влияний [1]. Активизация центральных механизмов

регуляции кровотока в кардиальном и дыхательном диапазонах частот была показана в [12] при проведении ортостатической пробы.

При обеспечении свободного венозного оттока и опорожнения вен руки наблюдается кратковременная дилатация как при поднимании руки выше уровня сердца, так и при ее опускании ниже уровня сердца [13]. В то же время в работе [10] констатируется и сужение сосудов, и их расширение при изменении положения руки относительно уровня сердца.

В работах [14, 15] делается вывод о том, что при развитии артериальной гипертензии доминирующим нарушением в системе микроциркуляции является затруднение оттока крови от капиллярного русла, т. е. застойные явления в венозном русле. Нормальное функционирование ВАР способствует снижению колебаний артериального давления, что может компенсировать дефицит ауторегуляторных возможностей [16].

Нарушение веноуло-артериолярного рефлекса наблюдается при сахарном диабете 1-го и 2-го типов [17, 18]. У пациентов с автономной диабетической периферической нейропатией выявляется нарушение ВАР с увеличением фильтрации жидкости через капилляры, развитием ортостатической гипотензии и отеков, приводящих к появлению язв и развитию синдрома диабетической стопы [17, 20]. Нарушение веноуло-артериолярного рефлекса прогрессирует вместе с увеличением степени диабетической периферической нейропатии, что связывают с изменением свойств симпатических нервных волокон и снижением реактивности микрососудов кожи [19]. Как у пациентов с сахарным диабетом, так и у пациентов с артериальной гипертензией, опускание ног в процессе проведения постуральной пробы приводит к снижению вейвлет-когерентности вариабельности ритма сердца и колебаний кожного кровотока конечностей в низкочастотном диапазоне [21].

Проявление ВАР наиболее полно исследовано при изменении положения нижней конечности ниже уровня сердца [22] и в меньшей степени исследовано при изменении положения верхней конечности и положения выше уровня сердца, что обосновывает актуальность данного направления работ.

Целью работы явилось выявление особенностей веноуло-артериолярного рефлекса методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) при проведении последовательности проб с изменением положения руки по набору параметров,



характеризующих динамику циркуляции крови в микрососудах пальца руки.

Материалы и методы

Исследование проведено на двух разновозрастных группах добровольцев. Первая включала 7 мужчин в возрасте 21–28 лет, у которых не было проявления выраженного веноу-артериолярного рефлекса в процессе проведения нагрузочной пробы, а вторая группа – 7 человек в возрасте 45–65 лет, у которых веноу-артериолярный рефлекс хорошо проявлялся. Участники эксперимента считались условно здоровыми и не имели сердечно-сосудистых заболеваний. Критериями исключения являлись: курение, высокое давление, сахарный диабет, любые проявления ОРВИ и прием спазмолитических препаратов.

Настоящее исследование одобрено Комитетом по этике Саратовского государственного медицинского университета им. В. И. Разумовского (протокол № 9 от 4.04.2023 г.) и осуществлялось в клинических условиях под наблюдением медицинского персонала. Все испытуемые перед участием подписывали информированное согласие на проведение исследования.

Эксперимент проводился в помещении с температурой воздуха $23 \pm 1^\circ\text{C}$ в положении сидя. На подушечку среднего пальца правой руки размещалось устройство «ЛАЗМА ПФ» (Россия) в котором применялся одночастотный лазер с длиной волны 850 нм, выходной мощностью непрерывного излучения не более 1 мВт и глубиной проникновения в кожу около 1 мм [23–25].

У каждого добровольца измерялись параметры микроциркуляции при двух положениях руки: «на уровне сердца» и при вертикально поднятой конечности (положение «вверх») [26]. Запись ЛДФ-граммы проводилась непрерывно в течение 18 мин: в течение первых 3 мин рука с датчиком находилась «на уровне сердца», затем рука переводилась и удерживалась в положении «вверх» в течение следующих 3 мин, далее рука возвращалась в исходное положение и цикл измерений повторялся ещё два раза. Таким образом, в ходе пробы непрерывный сигнал микроциркуляции регистрировался трехкратно в положении руки «на уровне сердца» и трехкратно в положении руки «вверх».

Затем ЛДФ-грамма разбивалась на шесть частей, каждая из которых анализировалась с помощью прилагаемого к устройству «ЛАЗМА-ПФ» программного обеспечения, включающего

спектральный вейвлет-анализ выбранных участков ЛДФ-граммы. Выбранный интервал времени обеспечивал возможность оценки параметров колебаний кровотока в миогенном и нейрогенном диапазонах, вычисляемых по вейвлет-спектру ЛДФ-граммы, при этом исключался переходной участок длительностью около 10 с.

Величины амплитуд нейрогенных колебаний, миогенных колебаний Ам, дыхательных колебаний Ад и сердечных колебаний Ас определялись по значению максимальной величины вейвлет-спектра соответствующего участка ЛДФ-граммы в частотных диапазонах нейрогенной (0.02–0.06 Гц), миогенной (0.06–0.2 Гц), дыхательной (0.2–0.6 Гц) и сердечной (0.6–1.6 Гц) регуляций. Амплитуда эндотелиальных колебаний не рассчитывалась, поскольку временной интервал ЛДФ-граммы для нее был очень мал.

Статистическая обработка результатов осуществлялась с использованием стандартных статистических методов пакета программ STATISTICA 10 (StatSoft, Inc.). Сравнение количественных переменных в двух зависимых выборках проводилось с помощью Т-критерия Вилкоксона. Этот выбор обусловлен размером выборки, которая не имеет нормальное распределение. За уровень статистически значимых принимали изменения при $p < 0.05$.

Результаты исследования

На рис. 1 приведены ЛДФ-граммы двух добровольцев при двух положениях руки: 1, 3, 5 – рука с датчиком «на уровне сердца»; 2, 4, 6 – рука с датчиком в положении «вверх». График показателя микроциркуляции показан красной линией, сигнал датчика движения показан черной линией (внизу), изменение температуры в области контроля микроциркуляции показано синей линией (вверху).

У обоих добровольцев в исходном положении руки фиксировался высокий уровень показателя микроциркуляции крови. При изменении ориентации руки из положения «на уровне сердца» в положение «вверх» в первые секунды происходило резкое уменьшение показателя микроциркуляции для обоих добровольцев. Однако у первого добровольца в течение следующих трех минут наблюдалось снижение показателя микроциркуляции и низкое значение среднеквадратического отклонения, а у второго добровольца – рост показателя микроциркуляции и высокое значение среднеквадратического отклонения.

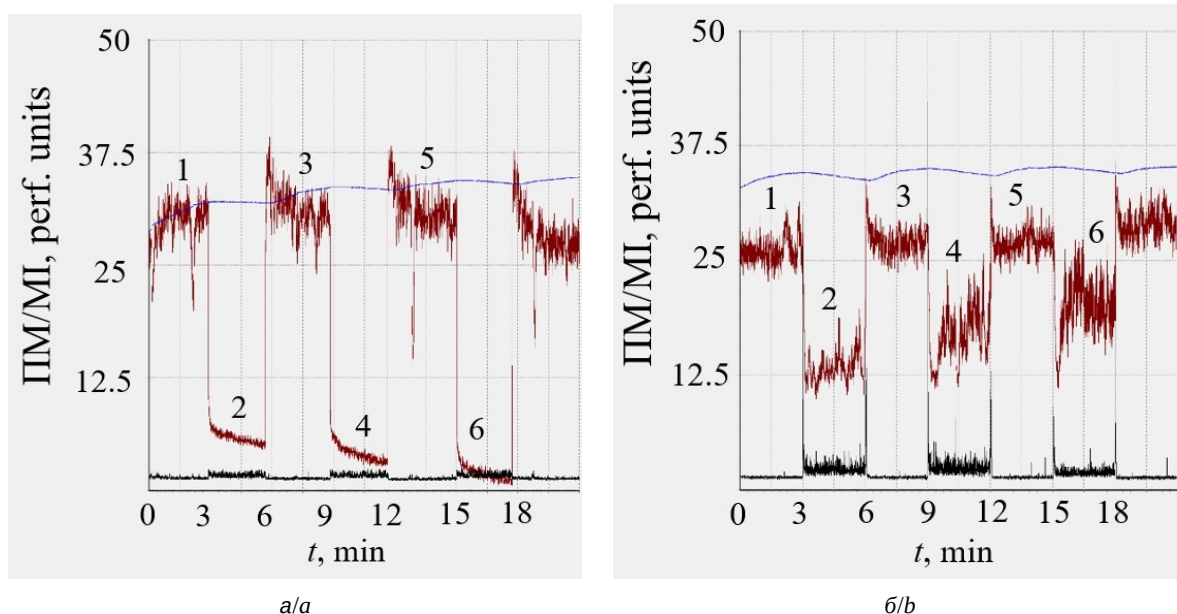


Рис. 1. Примеры типичных ЛДФ-грамм для двух испытуемых при двух положениях руки: 1, 3, 5 – рука с датчиком «на уровне сердца», 2, 4, 6 – рука с датчиком при поднятой конечности в положении «вверх»: а – возраст добровольца 26 лет, б – возраст добровольца 65 лет. Показатель микроциркуляции (красная линия), сигнал датчика движения (черная линия), кривая температуры (синяя линия) (цвет онлайн)

Fig. 1. Examples of typical LDF grams in two arm positions: 1, 3, 5 – arm with a sensor “at heart level”, 2, 4, 6 – arm with a sensor with a raised limb in the “up” position, for two subjects: а – the age of the volunteer is 26 years old, б – the age of the volunteer is 65 years old. Microcirculation indicator (red line), motion sensor signal (black line), temperature curve (blue line) (color online)

На рис. 2 приведены графики усредненного за три минуты (в каждом положении руки) показателя микроциркуляции (ПМ) для 7 здоровых молодых добровольцев первой группы (рис. 2, а) и 7 возрастных добровольцев второй группы (рис. 2, б). На рис. 2, в приведена динамика, усредненного по всей группе показателя микроциркуляции, при изменении положения руки здоровых молодых добровольцев первой группы, а на рис. 2, г – возрастных добровольцев второй группы.

Усредненные графики (см. рис. 2) демонстрируют одинаковый характер изменения показателя микроциркуляции, проявляющийся в его уменьшении при поднятии руки и связанный с уменьшением как давления в сосудах конечности, так и объема циркулирующей в ней крови. Как видно из рис. 2, в, г, среднее значение показателя микроциркуляции было больше в возрастной группе, а размах изменения показателя микроциркуляции при изменении положения руки был больше у группы молодых добровольцев.

По результатам измерений показателя микроциркуляции, на основании проведенного анализа статистических данных была обнаружена статистически значимая разница между положе-

ниями руки «на уровне сердца» и «вверх». Эта разница была выявлена в каждом цикле измерений. Для оценки статистической значимости использовался критерий Вилкоксона для зависимых выборок, и в каждом случае значение p было меньше 0.05.

Иной характер изменения демонстрируют рассчитанные по соответствующим диапазонам частот амплитуды нейрогенных и миогенных колебаний. На рис. 3 приведены графики изменения амплитуды нейрогенных колебаний при изменении положения руки молодых и возрастных добровольцев.

Как видно из рис. 3, графики изменения амплитуды нейрогенных колебаний у двух групп существенно различаются. Размах изменения амплитуды нейрогенных колебаний при изменении положения руки был больше у группы молодых добровольцев. Кроме того, в положении руки «вверх» у группы молодых добровольцев наблюдается уменьшение амплитуды нейрогенных колебаний, в то время как у группы возрастных добровольцев наблюдается ее увеличение. Причем с каждым следующим изменением положения руки это различие увеличивается.

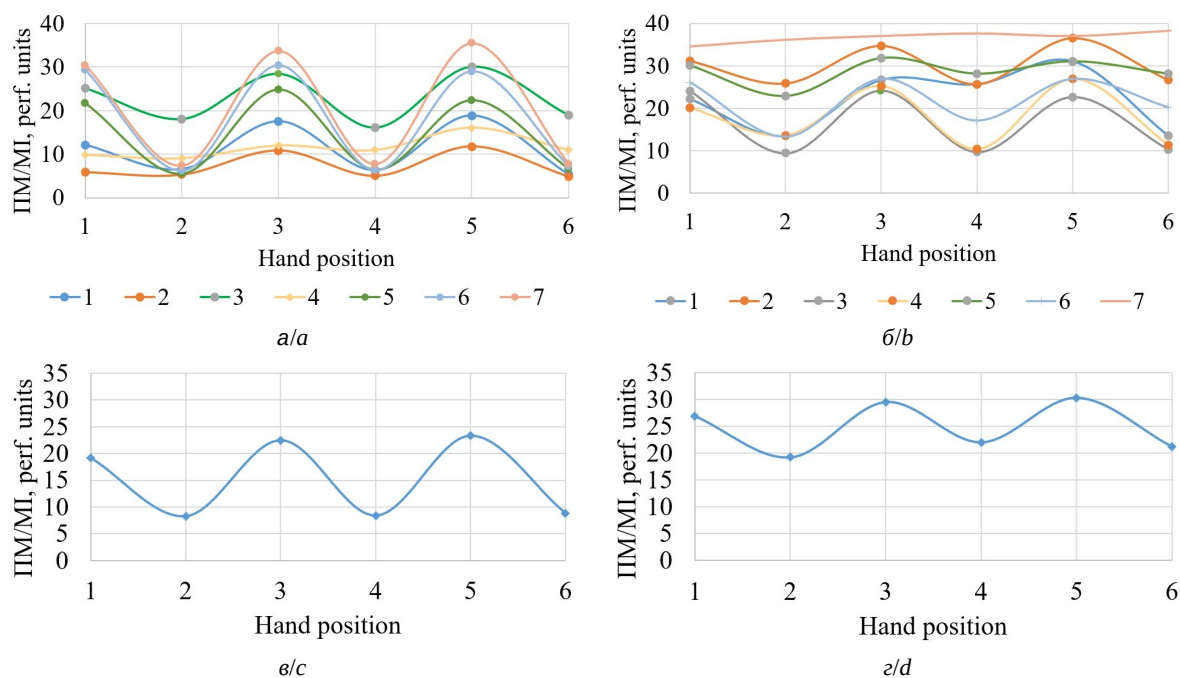


Рис. 2. Динамика показателя микроциркуляции (ПМ) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненного по всей группе показателя микроциркуляции здоровых молодых добровольцев, г – возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 2. Dynamics of the microcirculation index (MI) with a change in arm position: а – 7 healthy young volunteers of the first group, б – 7 age-related volunteers of the second group, в – the microcirculation index averaged over the entire group of healthy young volunteers, г – age-related volunteers (color online)

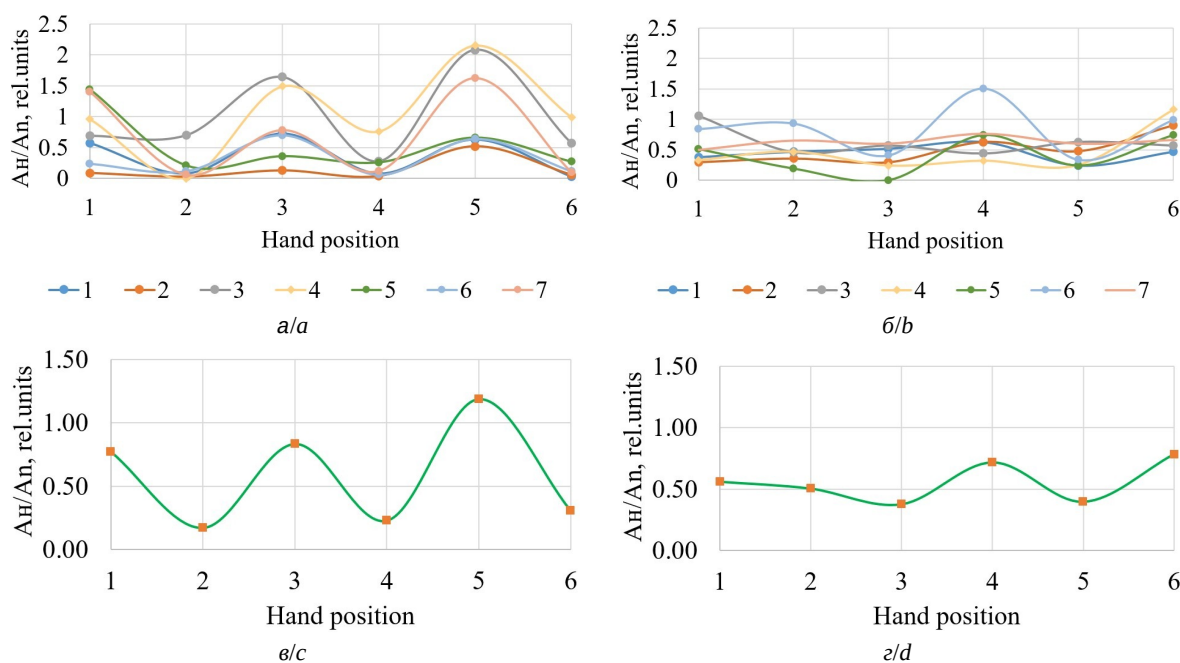


Рис. 3. Динамика амплитуды нейрогенных колебаний (Ан) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненной по всей группе амплитуды нейрогенных колебаний здоровых молодых добровольцев, г – усредненной по всей группе возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 3. Dynamics of the amplitude of neurogenic oscillations (An) when changing the position of the arm: а – 7 healthy young volunteers of the first group, б – 7 age-related volunteers of the second group, в – averaged over the entire group of amplitude of neurogenic oscillations of healthy young volunteers, г – averaged over the entire group of age-related volunteers (color online)



На рис. 4 приведены графики изменения амплитуды миогенных колебаний при изменении положения руки молодых и возрастных добровольцев.

Как видно из рис. 4, графики изменения амплитуды миогенных колебаний у двух групп также существенно различаются. В положениях руки «вверх» у группы молодых добровольцев наблюдается уменьшение амплитуды миогенных колебаний, в то время как у группы возрастных добровольцев наблюдается ее увеличение, и с каждым следующим изменением положения руки это различие увеличивается.

На рис. 5 приведены графики изменения амплитуды дыхательных колебаний A_d при изменении положения руки молодых и возрастных добровольцев.

Как видно из рис. 5, а–б, в первой группе у большинства молодых добровольцев при поднимании руки амплитуда дыхательных колебаний уменьшается, в то время как у возрастной группы наблюдается разнонаправленное изменение амплитуды дыхательных колебаний. Однако графики изменения усредненных значений амплитуды дыхательных колебаний у двух групп

имеют схожую динамику (рис. 5, в–г). Различие проявляется в величине размаха этого изменения, что может быть связано с физиологическими особенностями дыхательной функции молодых и возрастных групп при физической нагрузке, а также проявлением венозного застоя в возрастной группе.

На рис. 6 приведены графики изменения амплитуды сердечных колебаний A_c при изменении положения руки молодых и возрастных добровольцев.

Как видно из рис. 6, графики изменения амплитуды сердечных колебаний у двух групп имеют разнонаправленную динамику. Различие проявляется также в величине размаха этого изменения, что может быть связано с физиологическими особенностями работы сердца молодых и возрастных групп при физической нагрузке.

На рис. 7 приведены диаграммы разброса набора параметров при изменении положения руки.

Как видно из рис. 7, а, разброс величины показателя микроциркуляции у группы молодых добровольцев в положении руки «на уровне сердца» уменьшается, а в положении руки «вверх» увеличивается (рис. 7, б). У группы возраст-

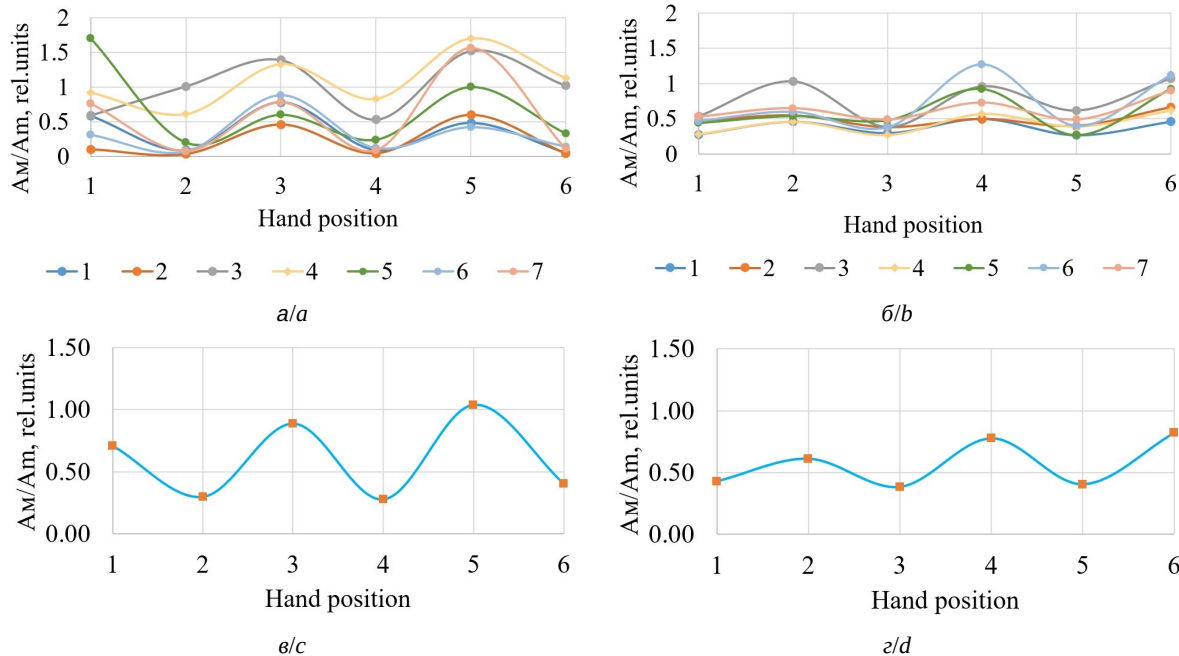


Рис. 4. Динамика амплитуды миогенных колебаний (A_m) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненной по всей группе амплитуды миогенных колебаний здоровых молодых добровольцев, г – усредненной по всей группе возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 4. Dynamics of the amplitude of myogenic oscillations (A_m) when changing the position of the arm: а – 7 healthy young volunteers of the first group, б – 7 age-related volunteers of the second group, в – averaged over the entire group of the amplitude of myogenic oscillations of healthy young volunteers, г – averaged over the entire group of age-related volunteers (color online)

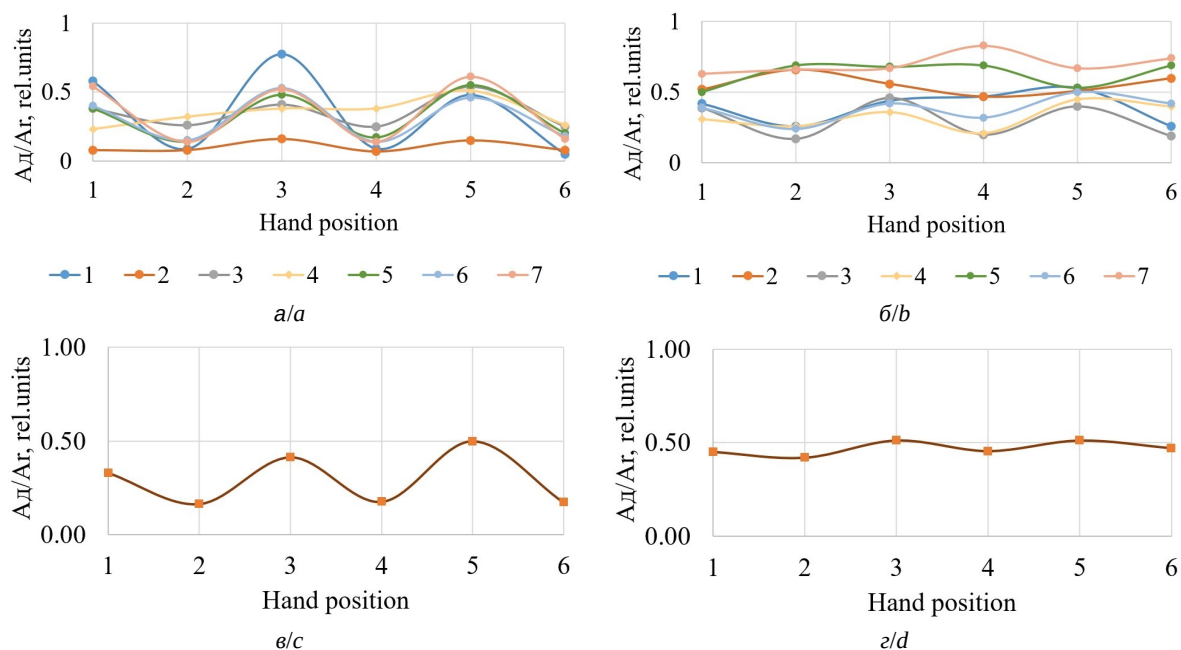


Рис. 5. Динамика амплитуды дыхательных колебаний (Ад) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненной по всей группе амплитуды дыхательных колебаний здоровых молодых добровольцев, г – усредненной по всей группе возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 5. Dynamics of the amplitude of respiratory oscillations (Ar) when changing the position of the arm: a – 7 healthy young volunteers of the first group, b – 7 age-related volunteers of the second group, c – averaged over the entire group of amplitude of respiratory oscillations of healthy young volunteers, d – averaged over the entire group of age-related volunteers (color online)

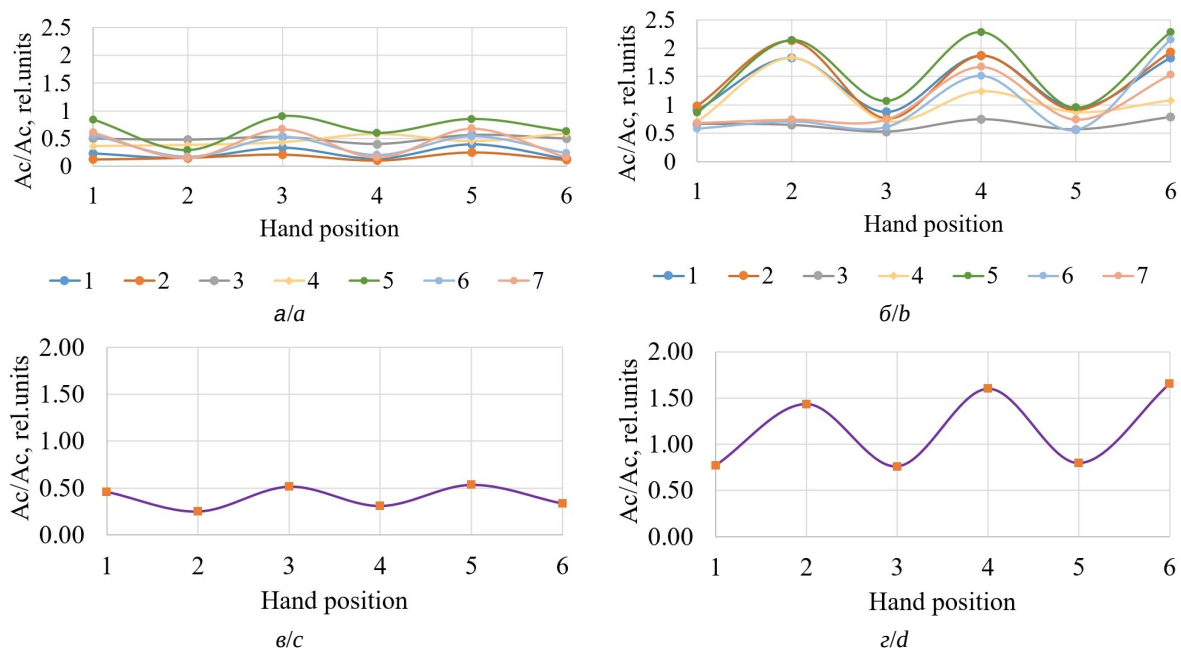


Рис. 6. Динамика амплитуды сердечных колебаний (Ас) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненной по всей группе амплитуды сердечных колебаний здоровых молодых добровольцев, г – усредненной по всей группе возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 6. Dynamics of the amplitude of cardiac oscillations (Ac) when changing the position of the arm: a – 7 healthy young volunteers of the first group, b – 7 age-related volunteers of the second group, c – averaged over the entire group of amplitude of cardiac oscillations of healthy young volunteers, d – averaged over the entire group of age-related volunteers (color online)

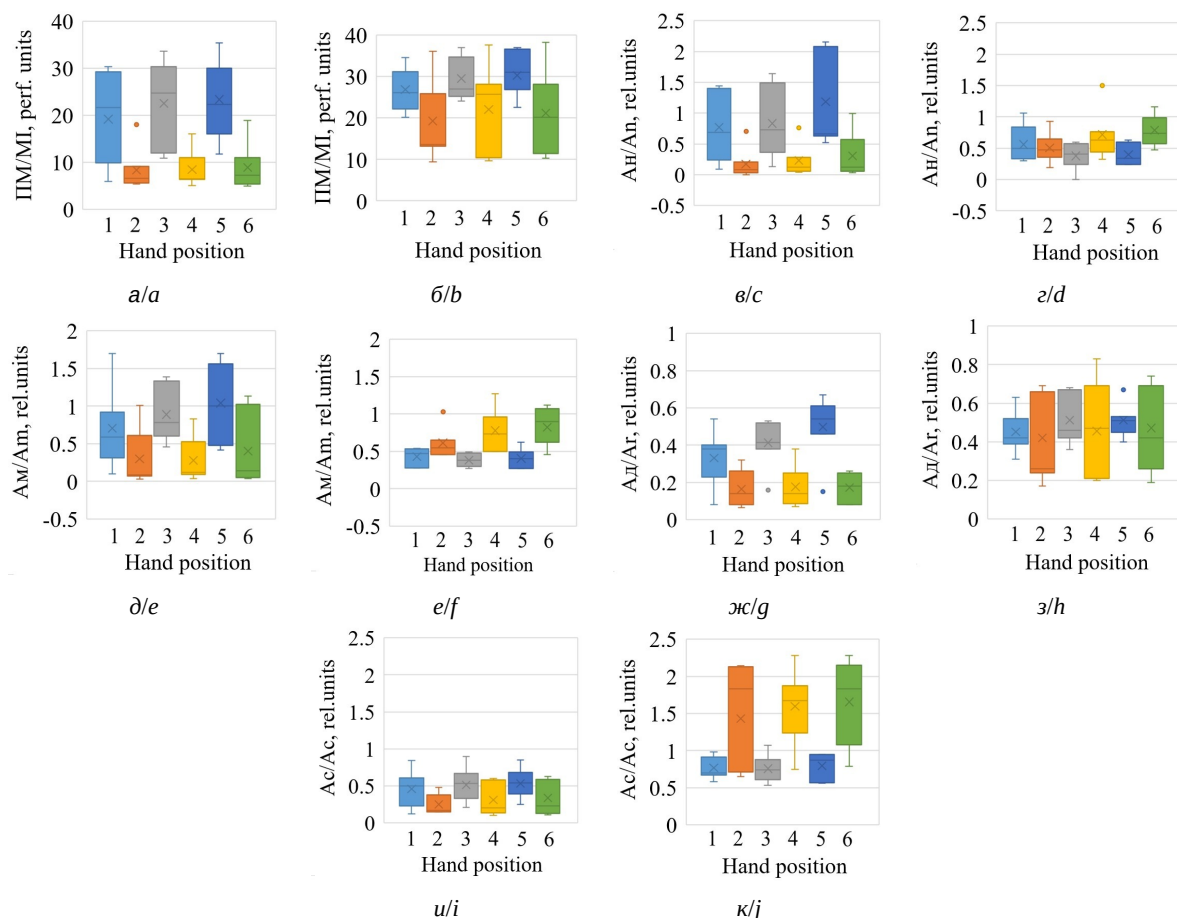


Рис. 7. Разброс набора параметров при изменении положения руки: а, в, д, ж, и – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы; б, г, е, з, к – 7 возрастных добровольцев второй группы (цвет онлайн)

Fig. 7. The spread of the set of parameters when changing the position of the arm: а, в, д, ж, и – 7 healthy young volunteers of the first group; б, г, е, з, к – 7 age-related volunteers of the second group (color online)

ных добровольцев разброс величины показателя микроциркуляции в положении руки «на уровне сердца» слабо изменяется, а в положении руки «вверх» увеличивается. Причем разброс величины показателя микроциркуляции значительно больше в положении руки «на уровне сердца» у группы молодых добровольцев, в то время как у группы возрастных добровольцев разброс величины показателя микроциркуляции значительно больше в положении руки «вверх». Такое различие в поведении разброса величины показателя микроциркуляции может быть объяснено изменением метаболизма человека с возрастом, приводящим к проявлению вено-артериального рефлекса.

Разброс амплитуды нейрогенных колебаний Ан у группы молодых добровольцев слабо изменяется при положении руки «на уровне сердца» и возрастает при положении руки «вверх» (рис. 7, в). У группы возрастных доброволь-

цев разброс амплитуды нейрогенных колебаний Ан слабо изменяется при обоих положениях руки (рис. 7, г). Разброс амплитуды миогенных колебаний при двух положениях руки у группы молодых добровольцев возрастает к третьему этапу (рис. 7, д). У группы возрастных добровольцев разброс амплитуды миогенных колебаний Ам возрастает к третьему этапу только при положении поднятой вверх руки (рис. 7, е). Низкий разброс амплитуд нейрогенных колебаний и миогенных колебаний можно связать с тем, что у молодых добровольцев в отсутствии проявлений ВАР вариабельность показателей больше по сравнению с разбросом у возрастных добровольцев, у которых проявление ВАР при поднятии руки приводит к ярко выраженному росту амплитуд миогенных колебаний.

Разброс амплитуды дыхательных Ад и сердечных Ас колебаний больше у группы возрастных добровольцев в положении руки «вверх»



(рис. 7, з, к), что может быть связано с физиологическими особенностями дыхательной и сердечной функции молодых и возрастных групп при физической нагрузке. При положении руки «вверх» амплитуда дыхательных волн и величина показателя микроциркуляции у молодых значительно падает, а у возрастных и ПМ высокий и амплитуды Ад остаются высокими, что может указывать на проявление застойных явлений в микроциркуляторном русле в группе возрастных.

Обращает на себя внимание увеличение среднего уровня амплитуды сердечных колебаний в положении руки «вверх» в группе возрастных (см. рис. 7, к). Это можно объяснить снижением венозного давления и опорожнением вен, приводящим к снижению сопротивления кровотоку и беспрепятственному поступлению артериальной крови через капилляры в венозное русло в данном положении руки. Вследствие таких процессов в период систолы регистрируется значительное увеличение ПМ в диапазоне сердечных колебаний, в период диастолы – значительное уменьшение ПМ по причине беспрепятственного оттока крови через систему венозных сосудов.

Обсуждение

Большинство проведенных исследований биомедицинского применения ВАР посвящено диагностике нарушений кровотока в нижних конечностях, осложнений сахарного диабета и регуляции тонуса артериальных сосудов [8–18]. Обсуждения результатов работ, посвященных физиологии данного рефлекса, зачастую противоречивы [5, 8]. При этом обычно проверяют сосудистую реакцию на повышение артериального давления при опускании руки ниже уровня сердца. Нами исследована реакция на понижение давления при поднимании руки выше сердца. Причем рука поднимается не на 25–30 см выше сердца [11], а на максимальную высоту строго вертикально вверх. И такой тест показал различия микрососудистого кровотока в группе молодых и в группе возрастных в состоянии руки вертикально вверх. В предложенной нами пробе исследуется реакция гемодинамики как на понижение артериального давления, так и на ее повышение до исходного уровня.

Картина изменения кровотока в микроциркуляторном русле при проведении функциональной пробы здорового молодого человека выглядит следующим образом. При поднимании руки происходит уменьшение кровяного давления

в артериях, венах и связанное с этим уменьшение кровенаполнения микроциркуляторного русла, регистрируемое методом ЛДФ по уменьшению показателя микроциркуляции. При этом резкое за 3–5 с понижение показателя микроциркуляции и уменьшение кровенаполнения микроциркуляторного русла свидетельствуют о влиянии сил гравитации на венозный возврат крови. В течение следующих 10–14 с происходит замедление этого процесса, что свидетельствует о появлении миогенной реакции гладкомышечных клеток.

При опускании руки происходит увеличение кровяного давления в артериях, венах и наблюдается связанное с этим увеличение кровенаполнения микроциркуляторного русла, регистрируемое по увеличению показателя микроциркуляции. При этом наблюдаются и резкое за 1–2 с изменение показателя микроциркуляции, и реактивная гиперемия за 8–10 с, выражающаяся в превышении исходных значений показателя микроциркуляции, и миогенная реакция гладкомышечных клеток, регулирующая восстановление кровенаполнения микроциркуляторного русла до исходных значений. Более быстрое наполнение кровеносного русла при опускании руки по сравнению с более медленным наполнением кровеносного русла при поднимании руки, возможно, свидетельствует о том, что тонус микрососудов в положении руки «вверх» меньше, чем тонус микроциркуляторного русла с базовым кровенаполнением, когда рука находится на уровне сердца.

Уменьшение тонуса микрососудов, когда рука находится в положении «вверх», и связанное с этим уменьшение упругости стенок кровеносных сосудов, также объясняет развитие состояния гиперемии с последующей ее компенсацией за счет миогенной реакции Бейлисса, приводящей к снижению и нормализации уровня показателя микроциркуляции.

Симпатический отдел вегетативной нервной системы человека по-разному реагирует на поднимание руки. У здорового молодого человека в течение продолжительного времени (от нескольких десятков секунд до минут) кровенаполнение микрососудов в положении руки «вверх» может не изменяться. У человека в возрасте или с нарушениями регуляции микрососудистого кровотока проявляется венуло-артериоларный рефлекс, приводящий к симпатической активации и нарастанию амплитуды нейрогенных колебаний кровотока в микрососудах при каждом следующем поднимании руки,



что способствует восстановлению величины объемного кровенаполнения.

Увеличение амплитуды нейрогенных и миогенных колебаний кровотока при поднимании руки должно приводить к уменьшению тонуса микрососудов и, следовательно, к сужению микрососудов. Однако сопутствующее этому явлению медленное нарастание кровенаполнения микрососудов русла при поднятой руке человека в возрасте свидетельствует о проявлении веноуло-артериолярного рефлекса. В работе [27] предложено объяснять изменения микрососудистого кровотока исключительно реакцией Бейлисса. Но миогенная реакция Бейлисса не может объяснить различную реакцию гладкомышечных клеток на одну и ту же функциональную пробу, связанную с уменьшением давления в сосудах поднятой руки: в одном случае происходит уменьшение амплитуды миогенных колебаний (у группы молодых добровольцев), в другом случае – ее увеличение (у группы возрастных добровольцев).

Заключение

Проявление веноуло-артериолярного рефлекса при проведении последовательности проб с изменением положения руки наблюдалось в группе возрастных добровольцев. При поднимании руки показатель микроциркуляции в положении руки «вверх» у молодых добровольцев значительно уменьшался (см. рис. 1, а), в то время как в возрастной группе показатель микроциркуляции в положении руки «вверх» после резкого снижения имел тенденцию к увеличению (см. рис. 1, б). При этом среднее значение показателя микроциркуляции в положении руки «вверх» уменьшалось и в отсутствие проявления веноуло-артериолярного рефлекса, и при его наличии (рис. 2).

Уменьшение тонуса микрососудов по сравнению с базовым кровенаполнением, когда рука находится в положении «вверх», и связанное с этим уменьшение упругости стенок кровеносных сосудов приводят к резкому возрастанию скорости кровотока при ее опускании, быстрому увеличению показателя микроциркуляции, развитию состояния гиперемии с последующей компенсацией за счет миогенной реакции Бейлисса, снижением и стабилизацией среднего уровня показателя микроциркуляции.

Амплитуды нейрогенных и миогенных колебаний микрососудистого кровотока имели в основном разнонаправленный характер в отсут-

ствие веноуло-артериолярного рефлекса, и при его наличии (см. рис. 3, 4). Такое различие объясняется нарастающей активизацией нейрогенных и миогенных колебаний микрососудистого кровотока при возникновении веноуло-артериолярного рефлекса, что способствует восстановлению величины объемного кровенаполнения.

Изменения усредненных значений амплитуды дыхательных колебаний у двух групп имеют схожий характер (см. рис. 5). Различие проявляется в величине размаха этого изменения, что может быть связано с физиологическими особенностями дыхательной функции молодых и возрастных групп при физической нагрузке и указывает на проявление застойных явлений в микроциркуляторном русле в группе возрастных добровольцев.

Изменения амплитуды сердечных колебаний у двух групп имеют разнонаправленный характер (см. рис. 6). Различие проявляется также в величине размаха этого изменения, что может быть также связано с физиологическими особенностями работы сердца молодых и возрастных групп при физической нагрузке.

Разброс величины показателя микроциркуляции значительно больше в положении руки «на уровне сердца» у группы молодых добровольцев, в то время как у группы возрастных добровольцев разброс величины показателя микроциркуляции значительно больше в положении руки «вверх». У молодых добровольцев в отсутствие проявлений ВАР вариабельность показателей больше в положении руки «вверх», в то время как в возрастной группе вариабельность показателей больше в положении руки «на уровне сердца».

Таким образом, тест с изменением положения конечности может давать ценную информацию о сохранности периферической иннервации микрососудов, что обосновывает перспективу применения данного теста в области выявления различных форм нейропатий и возрастных особенностей регуляции кровотока.

Список литературы

1. Silva H., Ferreira H. A., da Silva H. P., Monteiro R. L. The venoarteriolar reflex significantly reduces contralateral perfusion as part of the lower limb circulatory homeostasis *in vivo* // *Frontiers in Physiology*. 2018. Vol. 9. Art. 1123. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01123>
2. Silva H., Rezendes C. Revisiting the Venoarteriolar Reflex—Further Insights from Upper Limb Dependency



- in Healthy Subjects // *Biology*. 2024. Vol. 13, № 9. Art. 715. <https://doi.org/10.3390/biology13090715>
3. Федорович А. А. Микрососудистое русло кожи человека как объект исследования // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2017. Т. 16, № 4. С. 11–26. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2017-16-4-11-26>
 4. Boegehold M. A. Shear-dependent release of venular nitric oxide: Effect on arteriolar tone in rat striated muscle // *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 1996. Vol. 271, № 2. P. H387–H395. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1996.271.2.H387>
 5. Gelman S., Warner D. S., Warner M. A. Venous function and central venous pressure: A physiologic story // *The Journal of the American Society of Anesthesiologists*. 2008. Vol. 108, № 4. P. 735–748. <https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e3181672607>
 6. Cracowski J. L., Roustit M. Human skin microcirculation // *Compr. Physiol.* 2020. Vol. 10, № 3. P. 1105–1154. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190008>
 7. Low P. A. Venoarteriolar Reflex // *Primer on the Autonomic Nervous System* / 2nd ed. Elsevier Inc., 2004. P. 152–153. <https://doi.org/10.1016/B978-012589762-4/50039-6>
 8. Leyk D., Hoffmann U., Baum K., Wackerhage H., Essfeld D. Leg blood flow during slow head-down tilt with and without leg venous congestion // *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1998. Vol. 78. P. 538–543. <https://doi.org/10.1007/s004210050457>
 9. Monteiro R. L., Rocha C., Andrade S., Granja T., Gregório J. The acute adaptation of skin microcirculatory perfusion *in vivo* does not involve a local response but rather a centrally mediated adaptive reflex // *Frontiers in Physiology*. 2023. Vol. 14. Art. 1177583. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1177583>
 10. Estanol-Vidal B., Gutierrez-Manjarrez F., Martinez-Memije R., Senties-Madrid H., Berenguer-Sanchez M. J., Magana-Zamora L., Delgado-Garcia G., Chiquete-Anaya E. The two faces of venoarteriolar reflex: Cutaneous vasodilatation and vasoconstriction to raise and to lower the arm // *Revista de Neurología*. 2016. Vol. 62, № 9. Art. 403–407.
 11. Snyder K. A. M., Shamimi-Noori S., Wilson T. E., Monahan K. D. Age- and limb-related differences in the vasoconstrictor response to limb dependency are not mediated by a sympathetic mechanism in humans // *Acta Physiologica*. 2012. Vol. 205, № 3. P. 372–380. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2012.02416.x>
 12. Tikhonova I. V., Grinevich A. A., Guseva I. E., Tankanag A. V. Effect of orthostasis on the regulation of skin blood flow in upper and lower extremities in human // *Microcirculation*. 2021. Vol. 28, № 1. Art. 12655. <https://doi.org/10.1111/micc.126>
 13. Tschakovsky M. E., Hughson R. L. Venous emptying mediates a transient vasodilation in the human forearm // *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2000. Vol. 279, № 3. P. H1007–H1014. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.279.3.H1007>
 14. Федорович А. А. Взаимосвязь функционального состояния артериолярного и веноулярного отделов сосудистого русла кожи с уровнем артериального давления // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2009. Т. 8, № 4. С. 47–53.
 15. Федорович А. А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2010. Т. 9, № 1. С. 49–60.
 16. Wilson T. E., Zhang R., Levine B. D., Crandall C. G. Dynamic autoregulation of cutaneous circulation: Differential control in glabrous versus nonglabrous skin // *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2005. Vol. 289, № 1. P. H385–H391. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00622.2004>
 17. Куликов Д. А., Красулина К. А., Глазкова П. А., Ковалева Ю. А., Глазков А. А., Барсуков И. А. Метод лазерной доплеровской флоуметрии в оценке нарушений кожной микроциркуляции крови у пациентов с диабетической полинейропатией. Часть 2 // *Вестник Национального медико-хирургического центра имени Н. И. Пирогова*. 2021. Т. 16, № 3. С. 77–83. https://doi.org/10.25881/20728255_2021_16_3_77
 18. Yosipovitch G., Schneiderman J., van Dyk D. J., Chetrit A., Milo G., Boner G. Impairment of the postural venoarteriolar response in young type 1 diabetic patients: A study by laser doppler flowmetry // *Angiology*. 1996. Vol. 47, № 7. P. 687–691. <https://doi.org/10.1177/000331979604700708>
 19. Cacciatori V., Dellera A., Bellavere F., Bongiovanni L. G., Teatini F., Gemma M. L., Muggeo M. Comparative assessment of peripheral sympathetic function by postural vasoconstriction arteriolar reflex and sympathetic skin response in NIDDM patients // *The American Journal of Medicine*. 1997. Vol. 102, № 4. P. 365–370. [https://doi.org/10.1016/S0002-9343\(97\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0002-9343(97)00088-0)
 20. Зеленина Т. А., Салухов В. В., Земляной А. Б., Железняк С. Г., Клиценко О. А. Нарушение микроциркуляторного кровотока у больных сахарным диабетом 2 типа и кардиоваскулярной автономной нейропатией // *Сахарный диабет*. 2021. Т. 24, № 1. С. 35–47. <https://doi.org/10.14341/DM12372>
 21. Tikhonova I. V., Tankanag A. V., Guseva I. E., Grinevich A. A. Analysis of interactions between cardiovascular oscillations for discrimination of early vascular disorders in arterial hypertension and type 2 diabetes // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2023. Vol. 79. Art. 104222.
 22. Cracowski J. L., Roustit M. Human skin microcirculation // *Compr. Physiol.* 2020. Vol. 10, № 3. P. 1105–1154. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190008>
 23. Zharebtsov E. A., Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Zharebtsova A. I., Sidorov V. V., Rafailov E. U., Dunaev A. V. Wireless dynamic light scattering sensors detect microvascular changes associated with ageing and diabetes // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2023. Vol. 70, № 11. P. 3073–3081. <https://doi.org/10.1109/TBME.2023.3275654>



24. Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Fedorovich A. A., Gorshkov A. Y., Dunaev A. V. Assessment of blood microcirculation changes after COVID-19 using wearable laser Doppler flowmetry // *Diagnostics*. 2023. Vol. 13, № 5. Art. 920. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13050920>
25. Фролов А. В., Локтионова Ю. И., Жарких Е. В., Сидоров В. В., Крупаткин А. И., Дунаев А. В. Исследование изменений кожной микроциркуляции крови при выполнении дыхательной техники хатха-йоги // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2021. Т. 20, № 4. С. 33–44. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2021-20-4-33-44>
26. Скрипаль Ан. В., Фаркад Аль-Бадри, Машиков К. В., Усанов А. Д., Аверьянов А. П. Лазерная флоуметрия микроциркуляции крови пальца руки в зависимости от внешней температуры и положения конечности // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2023. Т. 22, № 4. С. 35–41. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2023-22-4-35-41>
27. Tusman G., Sipmann F. S., Böhm S. H. A skeptical look about the existence of the veno-arteriolar reflex // *The Journal of Physiology*. 2024. Vol. 602, № 9. P. 1855–1861.
8. Leyk D., Hoffmann U., Baum K., Wackerhage H., Essfeld D. Leg blood flow during slow head-down tilt with and without leg venous congestion. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1998, vol. 78, pp. 538–543. <https://doi.org/10.1007/s004210050457>
9. Monteiro R. L., Rocha C., Andrade S., Granja T., Gregório J. The acute adaptation of skin microcirculatory perfusion *in vivo* does not involve a local response but rather a centrally mediated adaptive reflex. *Frontiers in Physiology*, 2023, vol. 14, art. 1177583. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1177583>
10. Estanol-Vidal B., Gutierrez-Manjarrez F., Martinez-Memije R., Senties-Madrid H., Berenguer-Sanchez M. J., Magana-Zamora L., Delgado-García G., Chiquete-Anaya E. The two faces of venoarteriolar reflex: Cutaneous vasodilatation and vasoconstriction to raise and to lower the arm. *Revista de Neurología*, 2016, vol. 62, no. 9, pp. 403–407.
11. Snyder K. A. M., Shamimi-Noori S., Wilson T. E., Monahan K. D. Age- and limb-related differences in the vasoconstrictor response to limb dependency are not mediated by a sympathetic mechanism in humans. *Acta Physiologica*, 2012, vol. 205, no. 3, pp. 372–380. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2012.02416.x>
12. Tikhonova I. V., Grinevich A. A., Guseva I. E., Tankanag A. V. Effect of orthostasis on the regulation of skin blood flow in upper and lower extremities in human. *Microcirculation*, 2021, vol. 28, no. 1, art. 12655. <https://doi.org/10.1111/micc.126>
13. Tschakovsky M. E., Hughson R. L. Venous emptying mediates a transient vasodilation in the human forearm. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 2000, vol. 279, no. 3, pp. H1007–H1014. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.279.3.H1007>
14. Fedorovich A. A. The relationship of the functional state of the arteriolar and venular sections of the vascular bed of the skin with the level of blood pressure. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkuliatsiia* [Regional Blood Circulation and Microcirculation], 2009, vol. 8, no. 4, pp. 47–53 (in Russian).
15. Fedorovich A. A. The functional state of the regulatory mechanisms of microcirculatory blood flow in normal and arterial hypertension according to laser Doppler flowmetry. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkuliatsiia* [Regional Blood Circulation and Microcirculation], 2010, vol. 9, no. 1, pp. 49–60 (in Russian).
16. Wilson T. E., Zhang R., Levine B. D., Crandall C. G. Dynamic autoregulation of cutaneous circulation: Differential control in glabrous versus nonglabrous skin. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 2005, vol. 289, no. 1, pp. H385–H391. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00622.2004>
17. Kulikov D. A., Krasulina K. A., Glazkova P. A., Kovaleva Yu. A., Glazkov A. A., Barsukov I. A. The method of laser Doppler flowmetry in the assessment of disorders of skin microcirculation in patients with diabetic polyneuropathy. Part 2. *Vestnik Natsional'nogo mediko-khirurgicheskogo tsentra imeni N. I. Pirogova*. [Bulletin of the National Medical and Surgical Center



- named after N. I. Pirogov], 2021, vol. 16, no. 3, pp. 77–83. https://doi.org/10.25881/20728255_2021_16_3_77 (in Russian).
18. Yosipovitch G., Schneiderman J., van Dyk D. J., Chetrit A., Milo G., Boner G. Impairment of the Postural Venous Arteriolar Response in Young Type 1 Diabetic Patients: A Study by Laser Doppler Flowmetry. *Angiology*, 1996, vol. 47, no. 7, pp. 687–691. <https://doi.org/10.1177/000331979604700708>
19. Cacciatori V., Deller A., Bellavere F., Bongiovanni L. G., Teatini F., Gemma M. L., Muggeo M. Comparative assessment of peripheral sympathetic function by postural vasoconstriction arteriolar reflex and sympathetic skin response in NIDDM patients. *The American Journal of Medicine*, 1997, vol. 102, no. 4, pp. 365–370. [https://doi.org/10.1016/S0002-9343\(97\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0002-9343(97)00088-0)
20. Zelenina T. A., Salukhov V. V., Zemlyanoi A. B., Zheleznyak S. G., Klitsenko O. A. Violation of microcirculatory blood flow in patients with type 2 diabetes mellitus and cardiovascular autonomic neuropathy. *Sakharnyi diabet* [Diabetes Mellitus], 2021, vol. 24, no. 1, pp. 35–47 (in Russian). <https://doi.org/10.14341/DM12372>
21. Tikhonova I. V., Tankanag A. V., Guseva I. E., Grinevich A. A. Analysis of interactions between cardiovascular oscillations for discrimination of early vascular disorders in arterial hypertension and type 2 diabetes. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023, vol. 79, art. 104222.
22. Cracowski J. L., Roustit M. Human skin microcirculation. *Compr. Physiol.*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 1105–1154. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190008>
23. Zhrebtsov E. A., Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Zhrebtsova A. I., Sidorov V. V., Rafailov E. U., Dunaev A. V. Wireless dynamic light scattering sensors detect microvascular changes associated with ageing and diabetes. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2023, vol. 70, no. 1, pp. 3073–3081. <https://doi.org/10.1109/TBME.2023.3275654>
24. Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Fedorovich A. A., Gorshkov A. Y., Dunaev A. V. Assessment of blood microcirculation changes after COVID-19 using wearable laser Doppler flowmetry. *Diagnostics*, 2023, vol. 13, no. 5, art. 920. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13050920>
25. Frolov A. V., Loktionova Yu. I., Zharkikh E. V., Sidorov V. V., Krupatkin A. I., Dunaev A. V. Investigation of changes in skin microcirculation of blood during the performance of the hatha yoga breathing technique. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya* [Regional Blood Circulation and Microcirculation], 2021, vol. 20, no. 4, pp. 33–44 (in Russian). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2021-20-4-33-44>
26. Skripal An. V., Farkad Al-Badri, Mashkov K. V., Usanov A. D., Averyanov A. P. Laser flowmetry of microcirculation of the finger of the hand depending on the external temperature and position of the limb. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya* [Regional Blood Circulation and Microcirculation], 2023, vol. 22, no. 4, pp. 35–41. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2023-22-4-35-41>
27. Tusman G., Sipmann F. S., Böhm S. H. A skeptical look about the existence of the veno-arteriolar reflex. *The Journal of Physiology*, 2024, vol. 602, no. 9, pp. 1855–1861.

Поступила в редакцию 04.10.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 27.11.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 04.10.2024; approved after reviewing 21.11.2024; accepted for publication 27.11.2024; published 31.03.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 67–75

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 67–75

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-67-75>, EDN: LBZVSL

Научная статья

УДК 517.9:621.372

Стохастическая SIRS+V модель распространения инфекционных заболеваний



А. В. Шабунин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Шабунин Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики, shabuninav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3495-9418>, AuthorID: 34839

Аннотация. Работа посвящена построению и исследованию модели распространения инфекции в виде системы стохастических дифференциальных уравнений, учитывающей флуктуации параметров, характеризующих процессы заражения, выздоровления и потери иммунитета. За основу взята детерминированная SIRS+V модель, в которую добавлены ланжевеновские источники квазигауссова шума. В ходе численных исследований обнаружена колебательная динамика с характерным периодом, значение которого определяется параметрами детерминированной системы. Показано, что для моделирования хода инфекционных заболеваний недостаточно знания средних значений скоростей процессов инфицирования, выздоровления и потери иммунитета, но требуется также знать интенсивности флуктуаций этих величин. Разный уровень таких флуктуаций ведет к качественно разной наблюдаемой динамике эпидемии.

Ключевые слова: популяционная динамика, SIRS модель, стохастические системы

Для цитирования: Шабунин А. В. Стохастическая SIRS+V модель распространения инфекционных заболеваний // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 67–75. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-67-75>, EDN: LBZVSL

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Stochastic SIRS+V model of infections spread

A. V. Shabunin

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Alexey V. Shabunin, shabuninav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3495-9418>, AuthorID: 34839

Abstract. Background and Objectives: The aim of the paper is to construct a model of the spread of infection in the form of a system of stochastic differential equations that takes into account fluctuations in the parameters characterizing the processes of infection, restoration and loss of immunity. **Methods:** Numerical simulation of oscillations of a system of stochastic differential equations with Langevin sources. **Results:** A stochastic SIRS+V model of epidemic spread has been constructed in the form of a system of three differential equations with multiplicative sources of quasi-Gaussian noise. The model does not take into account the effect of the disease on the population size, while the population density is considered as a parameter affecting the course of the epidemic. The model demonstrates the long-term oscillatory dynamics observed in many viral diseases. **Conclusion:** Studies have shown that to model the course of infectious diseases, it is not enough to know the average values of the rates of infection, recovery and loss of immunity, but it is also necessary to know the intensity of fluctuations of these values. The different levels of such fluctuations lead to qualitatively different observed dynamics of the epidemic. The root-mean-square values of parameter fluctuations can be estimated during the analysis of empirical data obtained from observations of the spread of specific diseases, and then used in modeling. For example, when statistically analyzing a disease in the course of medical practice, it is not difficult to obtain a distribution of recovery times and loss of immunity. These observations will also make it possible to clarify the type of distribution functions for the Langevin sources used, which in practice may differ from Gaussian ones.

Keywords: population dynamics, SIRS model, stochastic systems

For citation: Shabunin A. V. Stochastic SIRS+V model of infections spread. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 67–75 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-67-75>, EDN: LBZVSL

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Математическое моделирование эпидемий является одним из приложений нелинейной ди-

намики [1–5]. Классические модели распространения инфекций представляют собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений



(ОДУ) [6–8]. Наиболее известной из них является модель SIRS, предложенная в 1920-х годах Кермаком и МакКендриком [9]. В SIRS модели популяцию разбивают на группы восприимчивых (S – Susceptible), инфицированных (I – Infectious) и иммунных (R – Recovered) особей и строят систему уравнений, определяющие закон изменения относительного числа особей в каждой из групп, опираясь на предположение о случайном и равномерном распределении особей в популяции. В работе [10] была предложена модификация SIRS модели (так называемая SIRS+V модель), в которой передача инфекции происходит опосредовано, за счет взаимодействия с агентом-переносчиком, в качестве которого могут выступать вирусы или бактерии. Такой подход позволяет учесть инерционность процессов заражения. Он может быть полезен для прогнозирования распространения тех инфекций, при которых агент, вызывающий заражение, является подвижным и относительно долгоживущим, поэтому заражение может происходить в отрыве от непосредственного контакта между особями.

В фазовом пространстве SIRS+V модели (как и исходной SIRS модели) имеется единственный аттрактор в виде состояния равновесия. Соответственно, при любых условиях она предсказывает переход к стационарному состоянию динамического равновесия между числом заболевших и излечившихся. Между тем, многие вирусные инфекции демонстрируют долговременную колебательную динамику с резкими пиками заболевания большой амплитуды, повторяющиеся с характерным периодом [11,12]. Колебательная динамика особенно характерна для инфекций с высокой эффективностью передачи и скоротечностью [5]. Одной из ее причин может служить периодическая модуляция параметров системы (3), вызванная климатическими факторами [10]. Однако климатический фактор может быть не единственным. Другой вероятной причиной расхождения между наблюдаемой динамикой и моделью может являться чисто детерминированный характер последней. Детерминированные модели не учитывают конечность размеров популяции и случайные флуктуации внешней среды. Для их учета необходим переход от детерминированных моделей к стохастическим [11–16].

Одной из первых стохастических моделей процессов распространения инфекций явилось рассмотрение их в виде дискретной марковской

цепи, решение для которой ищется методом Монте-Карло [12]. Развитием данного подхода можно считать имитационное моделирование эпидемий методами вероятностных клеточных автоматов [17–20]. Еще одним способом моделирования являются стохастические дифференциальные уравнения (СДУ) – дифференциальные уравнения, где некоторые слагаемые представляют стохастические процессы [21]. Такие уравнения использовались для анализа SIRS модели в условиях действия случайных факторов окружающей среды [22–24]. В настоящей работе мы строим СДУ для SIRS+V модели и исследуем его динамику в зависимости от интенсивности случайных флуктуаций.

Статья состоит из введения, трех разделов и заключения. В первом разделе рассматривается детерминированная SIRS+V модель распространения эпидемий, ее свойства, долговременная и переходная динамика в зависимости от параметров. Второй раздел посвящен формулировке стохастической SIRS+V модели, рассмотрению необходимых ограничений на используемые источники шума. В заключительном, третьем, разделе приводятся результаты численного исследования поведения стохастической модели в зависимости от интенсивности флуктуаций и проводится анализ наблюдающихся колебаний.

1. Гибридная SIRS+V модель распространения инфекционных заболеваний

В работе [10] была предложена модифицированная SIRS модель распространения инфекционных заболеваний, в которой явным образом использовались уравнения для агента заражения (например, вирусов):

$$\begin{aligned} s' &= -P_1(v)s + P_3r, \\ i' &= P_1(v)s - P_2i, \\ r' &= P_2i - P_3r, \\ v' &= \beta i - \mu v. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь s , i и r – относительные плотности населения восприимчивых, зараженных и иммунных особей, соответственно; v – нормированная концентрация вирусов. Первые три уравнения описывают процессы заражения ($P_1(v)s$), излечения (P_2i) и потери иммунитета (P_3r). Каждый из них характеризуется соответствующей скоростью: $P_i \in [0,1]$, при этом скорость заражения



(P_1) зависит от концентрации вирусов: $P_1(v) = 1 - \exp(-v)$ ¹. Оставшееся уравнение системы задает динамику концентрации вирусов, растущую за счет генерации больными особями (βi) и уменьшающуюся при их инактивации (μv); параметры β и μ являются положительными константами.

Из контекста задачи следуют очевидные ограничения на выбор начальных условий: $s_0, i_0, r_0, v_0 \geq 0$. Эти ограничения обеспечивают неотрицательность значений переменных и в ходе дальнейшей эволюции системы (1). Действительно, решение системы (1) не может пересечь координатные плоскости, соответственно, переменные не могут сменить знак, так как правые части уравнений при подходе к координатным плоскостям всегда положительны. Кроме того, из очевидного выполнения условия $s' + i' + r' = 0$ следует сохранение общей плотности населения:

$$s + i + r = C, \quad (2)$$

где $C \geq 0$. Последнее свойство можно использовать для уменьшения числа независимых переменных, переписав систему уравнений в виде:

$$\begin{aligned} i' &= P_1(v)(C - i - r) - P_2 i, \\ r' &= P_2 i - P_3 r, \\ v' &= \beta i - \mu v, \end{aligned} \quad (3)$$

и учитывая при этом дополнительное ограничение на выбор начальных значений для i и r : $i_0 + r_0 \leq C$.

Поведение системы (3) и устройство ее фазового пространства были исследованы в работе [10]. В частности, было показано, что система (3) имеет два состояния равновесия: тривиальное $E_0 = (0, 0, 0)$ и нетривиальное

$$E_1 = \left(I, \frac{P_2}{P_3} I, \frac{\beta}{\mu} I \right), \quad (4)$$

где значение I определяется как корень трансцендентного уравнения:

$$I = \frac{1}{1 + \frac{P_2}{P_3}} \left(C - \frac{P_2 I}{1 + \exp\left(-\frac{\beta}{\mu} I\right)} \right). \quad (5)$$

Устойчивость точки E_0 соответствует случаю полного выздоровления популяции. Оно реализуется при $P_2 > \beta C / \mu$. При обратном знаке неравенства устойчивым оказывается состояние

E_1 , соответствующее выходу заболевания на стационарный уровень с относительной плотностью заболевших I . Именно этот случай и представляет для нас основной интерес.

Далее будем рассматривать систему (3) при фиксированных параметрах, типичных для ряда респираторно-вирусных заболеваний: $P_2 = 1/7$ (т. е. средний интервал излечения составляет одну неделю), $P_3 = 1/300$ (иммунитет держится около года), $\beta = 0.4$, $\mu = 0.5$ (вирусы сохраняют способность к заражению в течение двух дней), и при $C = 0.5$. Как показывает расчет собственных чисел, проведенный в [10], при данном выборе параметров и в достаточно широкой области вокруг них точка E_1 является устойчивым фокусом.

Выберем начальные условия, соответствующие ситуации заражения популяции при проникновении в нее извне малой группы зараженных особей: $i_0 = 0.001$, $r_0 = 0$ и $v_0 = 0$. Последующее течение заболевания определяется траекторией системы (3), которая представляет собой переходный процесс от начальной точки к E_1 (рис. 1, а). Характер этого процесса определяется устройством фазового пространства в окрестности фокуса E_1 : при подходе к последнему траектория совершает несколько витков, демонстрируя вначале значительные осцилляции числа заболевших, постепенно уменьшающиеся по амплитуде (рис. 1, б).

Как следует из рис. 1, а, в самом начале эпидемии наблюдается быстрый (почти экспоненциальный) рост числа заболевших, за которым следует такой же быстрый спад практически до нуля; после него в течение длительного интервала времени число заболевших остается чрезвычайно низким. На этом этапе может возникнуть иллюзия «полной победы» над болезнью. Однако далее, спустя продолжительный интервал, следует второй пик заражения, уже существенно меньшей величины, после чего траектория выходит на уровень, близкий к I , на котором она и остается в дальнейшем. С точки зрения популяционной динамики данное поведение можно интерпретировать как затухающую последовательность волн заражения, при которой уровень заражения популяции демонстрирует последовательность пиков, прежде чем эпидемия достигнет динамического равновесия.

Описанная выше временная эволюция отличается от течения многих реально наблюдаемых

¹ Данная функция демонстрирует почти линейный рост при $v \simeq 0$ и насыщение к единице при $v \rightarrow \infty$.

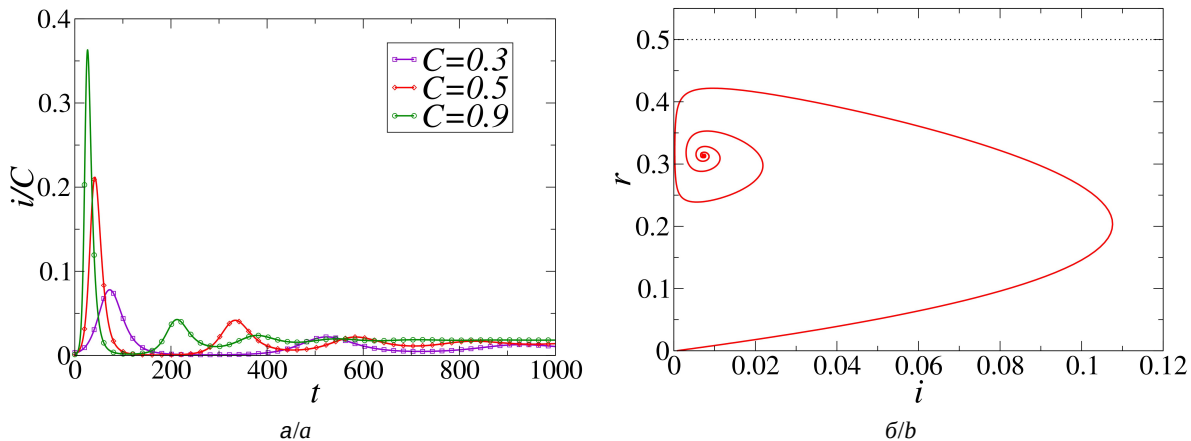


Рис. 1. Временная реализация $i(t)$ на начальном этапе эпидемии (а) и фазовый портрет в координатах $i - r$ (б), построенные для детерминированной модели (3) (цвет онлайн)
Fig. 1. Time series $i(t)$ at the first stage of the epidemic (a) and the phase portrait in the (i, r) coordinate plane (b) for the deterministic model (3) (color online)

инфекций (см., например, рис. 6.3 и другие рисунки из монографии [5]), для которых характерны перманентные осцилляции уровня заболевания с чередованием интервалов почти полного выздоровления и резких пиков повторных заражений. Как уже было отмечено выше, перманентные колебания могут быть вызваны случайными флуктуациями численностей групп s , i и r . Чтобы их учесть необходимо перейти от детерминированной модели ОДУ к стохастическим дифференциальным уравнениям.

2. Стохастическая SIRS+V модель

Для формирования стохастической модели в исследуемую динамическую систему (3) необходимо добавить источники шума. К сожалению, здесь неприменим традиционный подход в виде использования аддитивного белого гауссова шума (АБГШ), по причине несовместимости последнего с SIRS+V моделью. Действительно, при условии сохранения общей численности населения изменение численности одной из групп особей может произойти только за счет изменения двух других. Кроме того, такое перераспределение должно быть совместимо с происходящей в популяции цепочкой реакций:

$$S \rightarrow I \rightarrow R \rightarrow S.$$

Соответствия можно добиться посредством введения случайной модуляции параметров P_j ($j = 1, 2, 3$), управляющих процессами инфицирования: $p_j = P_j(1 + \xi_\sigma^{(j)}(t))$, произведя в исходной

системе (1) замену: $P_j \rightarrow p_j$. Модулирующие функции: $\xi_\sigma^{(j)}(t)$ – некоррелированные квазигауссовы источники белого шума интенсивностями σ , амплитуда которых ограничена единицей:

$$\xi_\sigma(t) = \begin{cases} g_\sigma(t), & |g_\sigma| < 1, \\ 1, & g_\sigma \geq 1, \\ -1, & g_\sigma \leq -1, \end{cases} \quad (6)$$

где $g_\sigma(t)$ – гауссов источник с нулевым средним и дисперсией σ^2 . Ограничение амплитуды шума, введенное в формуле (6), необходимо для предотвращения получения параметрами P_j отрицательных значений, что несовместимо с биологическими процессами².

Выполнив приведенные выше замены параметров и перегруппировав слагаемые, получим систему стохастических дифференциальных уравнений в форме Ланжевена:

$$\begin{aligned} i' &= P_1(v)(C - i - r) - P_2 i + \\ &\quad + P_1(v)(C - i - r)\xi^{(1)}(t) - P_2 i \xi^{(2)}(t), \\ r' &= P_2 i - P_3 r + P_2 i \xi^{(2)}(t) - P_3 r \xi^{(3)}(t), \\ v' &= \beta i - \mu v. \end{aligned} \quad (7)$$

Значения интенсивностей σ_j зависят от вариабельностей соответствующих параметров, которые определяются биологическими факторами. Последние могут быть эмпирически оценены для конкретных заболеваний и использоваться затем при их моделировании. В нашем исследовании будем полагать вариабельность всех

²Отрицательное значение параметра означает обратный ход соответствующего процесса, что невозможно.



трех параметров одинаковой: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$. Данная система описывает SIRS+V модель, действующую в условиях флуктуаций, интенсивность которых задается параметром σ .

3. Численные исследования модели

Проведем численные исследования уравнений (7) в зависимости от σ . Остальные параметры и начальные условия сохранены из модели ОДУ. Для получения численного интегрирования стохастических дифференциальных уравнений используется метод Эйлера–Маруямы [25].

Рассмотрим, как меняется временная реализация $i(t)$ при постепенном увеличении интенсивности шума σ . Слабый шум при $\sigma < 0.1$ практически не влияет на динамику системы. При $\sigma = 0.1$ мы наблюдаем вначале тот же переходный процесс к E_1 , что и в исходной бесшумной системе, а затем – небольшие флуктуации временной реализации вокруг среднего значения (рис. 2, а). С ростом интенсивности модуляции амплитуда колебаний постепенно растет, а в их форме начинает проявляться четко выраженный характерный период. Пример таких

колебаний для $\sigma = 0.2$ показан на рис. 2, б. Далее, при $\sigma \simeq 0.5$ форма колебаний начинает качественно меняться: максимумы заражений становятся более резкими, а минимумы – плоскими. В результате, мы наблюдаем спайковые колебания, характерные для некоторых возбудимых систем [26, 27]. Так, при достижении интенсивности шума значения $\sigma = 0.5$ (рис. 2, в) в системе формируется близкая к периодической последовательность резких пиков разной амплитуды, перемежающаяся интервалами почти полного выздоровления. Амплитуда многих пиков близка к величине второй волны заражения, а некоторых и превосходит ее. С дальнейшим ростом σ колебания в целом усиливаются по амплитуде, становясь все более резкими по форме. Наряду с похожими друг на друга «стандартными» импульсами, время от времени наблюдаются отдельные сверхвысокие пики, величина которых может быть сопоставима с первой волной заражения.

Таким образом случайная модуляция параметров приводит к стохастическим колебаниям с некоторым характерным периодом. Определим

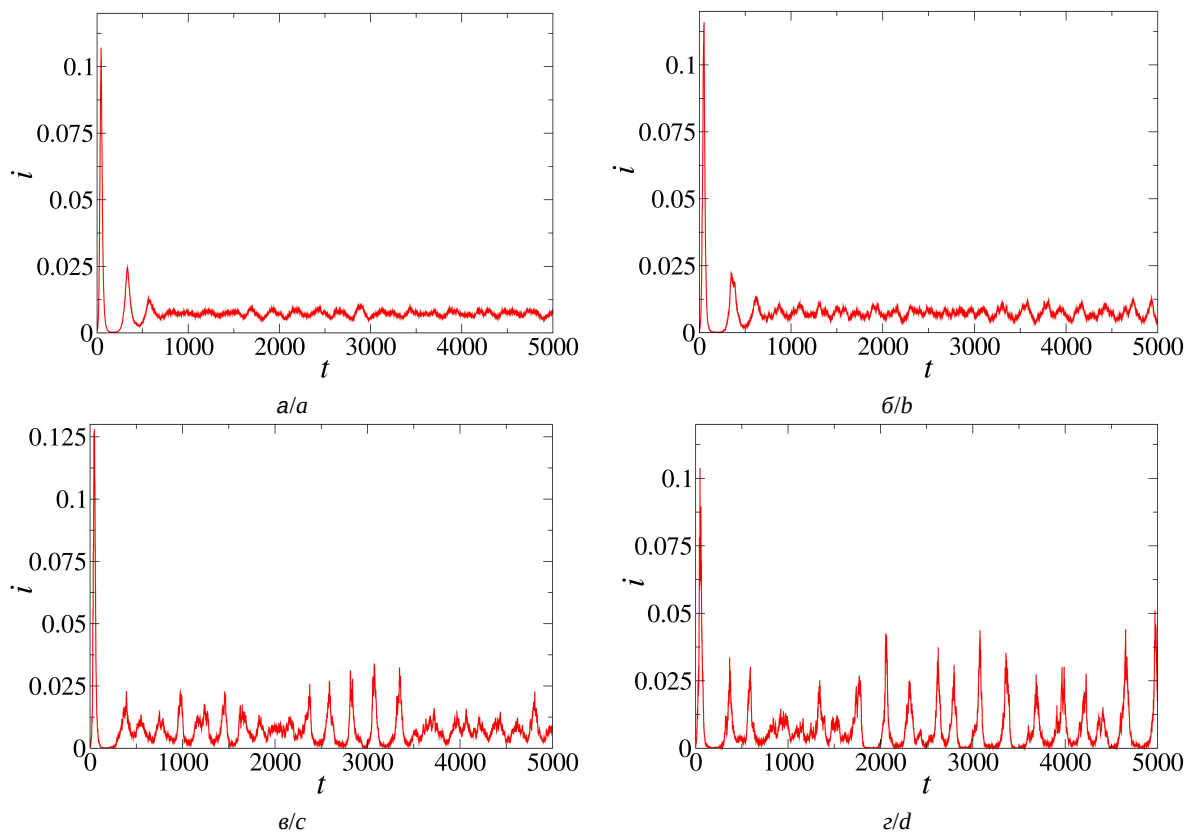


Рис. 2. Временная реализация $i(t)$ на начальном этапе эпидемии при $\sigma = 0.1$ (а), $\sigma = 0.2$ (б), $\sigma = 0.5$ (в), $\sigma = 0.7$ (г)

Fig. 2. Time series $i(t)$ at the first stage of the epidemy at $\sigma = 0.1$ (a), $\sigma = 0.2$ (b), $\sigma = 0.5$ (c), $\sigma = 0.7$ (d)



его величину. Для этого удобно использовать Фурье-спектры установившихся колебаний. Произведем расчет спектров мощности от $i(t)$ с отброшенным начальным интервалом $0 \leq t < 1000$. Результаты расчетов представлены на рис. 3 в полулогарифмическом масштабе. Как следует из рисунка, спектры имеют сложную форму, свидетельствующую о нерегулярном характере колебаний, одновременно с этим демонстрируя выраженный максимум, значение которого меняется от $f_0 \simeq 0.0041$ при $\sigma = 0.1$ до $f_0 \simeq 0.0036$ при $\sigma = 0.9$.

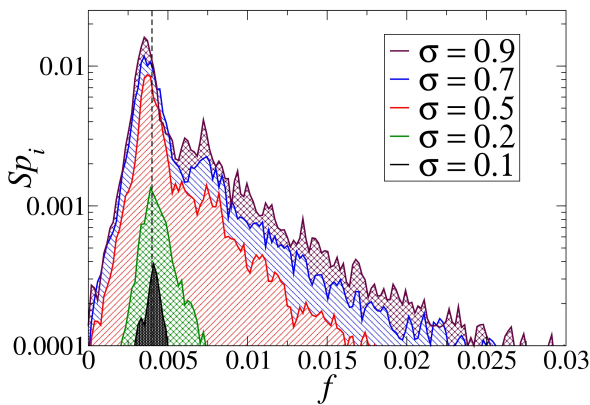


Рис. 3. Изменение спектра мощности установившихся колебаний с ростом σ ; вертикальная штриховая линия отмечает частоту, соответствующую частоте вращения траектории вокруг фокуса E_1 (цвет онлайн)

Fig. 3. Change of the power spectrum of steady-state oscillations with σ growth; the vertical dash line marks the frequency of rotation around E_1 focus (color online)

Наличие максимума подтверждает присутствие в колебаниях характерного временного масштаба, величина которого, как мы видим, слабо зависит от интенсивности шума. Слабая зависимость f_0 от σ свидетельствует о том, что средний период колебаний определяется внутренними факторами системы (3), то есть устройством ее фазового пространства. Действительно, проведенный расчет показывает, что круговая частота $\omega_0 = 2\pi f_0$ весьма близка к частоте обращения фазовой траектории вокруг фокуса E_1 . Последнюю легко оценить по собственным числам состояния равновесия, которые для выбранных параметров равны: $\lambda_1 = -0.6435$, $\lambda_{2,3} = -0.00424 \pm 0.0254j$, что соответствует $f_\phi = 0.00404$. Как мы видим, при небольших σ обе частоты примерно равны: $f_0 \simeq f_\phi$, а при больших интенсивностях модуляции частота колебаний становится чуть меньше.

Рассмотрим как зависит амплитуда установившихся стохастических колебаний от интенсивности шума σ . Под амплитудой здесь понимается разность между максимальным и минимальным значением $i(t)$ на интервале наблюдения: $A_i = \max_{t \in T}(i(t)) - \min_{t \in T}(i(t)) \simeq \max_{t \in T}(i(t))$. График рассчитанных значений $A_i(\sigma)$ представлен на рис. 4 в виде кривой, отмеченной кружками. Из него видно, что амплитуда, как и ожидалось, монотонно растет с ростом интенсивности флуктуаций. Эта зависимость носит нелинейный характер; при больших σ величина A_i становится близкой к максимальному пику заболевания, наблюдающемуся в самом начале эпидемии.

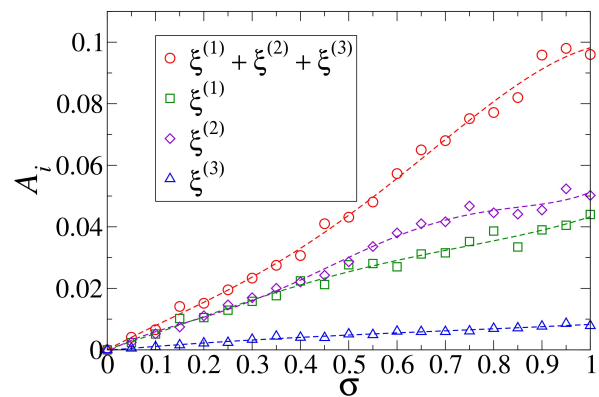


Рис. 4. Зависимость амплитуды стохастических колебаний от σ (цвет онлайн)

Fig. 4. The amplitude of stochastic oscillations versus σ (color online)

Рассматриваемая до настоящего момента стохастическая модель (7) содержала три источника шума равной интенсивности. Таким образом, изучался совокупный вклад от вариативности всех трех процессов, определяющий динамику особей: заражение, излечение и потеря иммунитета. Интересно выяснить, насколько флуктуации каждого из параметров P_j по отдельности влияют на интенсивность стохастических колебаний. Для этого, проведем те же расчеты, но с «отключением» двух источников $\xi_{(j)}$ из трех и построим соответствующие зависимости на том же рис. 4. Из сопоставления графиков видно, что флуктуации процессов заражения и излечения несут сопоставимый вклад в общую интенсивность колебаний, тогда как влияние флуктуации процесса потери иммунитета приводят к колебаниям существенно меньшей амплитуды. Если построить временные реализации стохастических колебаний, обусловленные каждым из источников в отдельности, то мы



увидим подтверждение этому. На рис. 5 приведены соответствующие графики. Флуктуации параметров P_1 и P_2 ведут к спайковым колебаниям значительной амплитуды, в то время как сопоставимые по интенсивности флуктуации P_3 дают лишь небольшие отклонения численности заболевших от среднего уровня.

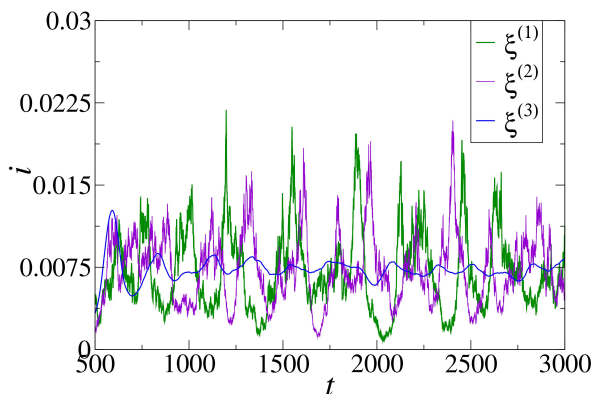


Рис. 5. Временные реализации колебаний $i(t)$ при включенных по отдельности источниках шума; $\sigma = 0.7$ (цвет онлайн)

Fig. 5. Time series of oscillations $i(t)$ at separate noise sources; $\sigma = 0.7$ (color online)

Проведенные исследования продемонстрировали существенное влияние флуктуаций параметров на долговременную динамику эпидемии. В то же время, как видно из рис. 2, а–г, их воздействие на начальный период, то есть на первую волну заражения, незначительно. На этом этапе развитие заболевания зависит преимущественно от средних значений параметров, а не от их вариабельности.

Заключение

В работе предложена стохастическая SIRS+V модель в форме СДУ с ланжевеновскими источниками. В этой модели управляющими параметрами являются не только средние значения кинетических констант, управляющих процессами заражения, выздоровления и потери иммунитета, но и величины разброса этих констант, вокруг средних значений, т. е. их среднеквадратичные отклонения. Последние могут быть оценены в ходе анализа эмпирических данных, получаемых при наблюдениях за распространением конкретных заболеваний. Например, при статистическом анализе заболевания в ходе врачебной практики нетрудно получить распределение времен выздоровления и потери иммунитета.

Проведенные численные исследования стохастической модели показали, что она демонстрирует долговременную динамику, характерную для эпидемических процессов, наблюдаемых в природных популяциях. При уровне флуктуаций параметров, составляющем более десяти процентов от их величины, наблюдаются перманентные колебания числа зараженных, характерный период которых определяется средними значениями параметров и может быть оценен из собственных чисел состояния равновесия детерминированной модели. При более высокой вариабельности параметров (порядка пятидесяти процентов от величины) колебания приобретают спайковую форму, характерную для многих наблюдаемых в природе вирусных инфекций.

Рассматривая система является достаточно грубой, поскольку не учитывает многие особенности заболеваний, которые должны быть определены при применении ее для моделирования распространения конкретных инфекций. Одним из путей такого уточнения является определение функций распределения для используемых ланжевеновских источников, которые могут быть получены из наблюдений. Модификация модели может идти также по пути уточнения вида функции $P_1(v)$, например с учетом порогового характера заражения, наблюдаемого для некоторых заболеваний, а также посредством использования нелинейного уравнения, описывающего генерацию вирусов.

Список литературы

1. Бейли Н. Математика в биологии и медицине. М. : Мир, 1970. 326 с.
2. Марчук Г. И. Математические модели в иммунологии. Вычислительные методы и эксперименты. М. : Наука, 1991. 276 с.
3. Hethcote H. W. The mathematics of infectious diseases // SIAM Review. 2000. Vol. 42. P. 599–653. <https://doi.org/10.1137/S0036144500371907>
4. Базыкин А. Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.
5. Андерсон Р., Мэй Р. Инфекционные болезни человека. Динамика и контроль. М. : Мир, 2004. 784 с.
6. Ross R. An application of the theory of probabilities to the study of a priori pathometry. Part I // Proc. R. Soc. 1916. Vol. A92. P. 204–230. <https://doi.org/10.1098/rspa.1916.0007>
7. Ross R. An application of the theory of probabilities to the study of a priori pathometry. Part II // Proc. R. Soc. 1917. Vol. A93. P. 212–225. <https://doi.org/10.1098/rspa.1917.0014>



8. Ross R., Hudson H. An application of the theory of probabilities to the study of a priori pathometry. Part III // *Proc. R. Soc.* 1917. Vol. A93. P. 225–240. <https://doi.org/10.1098/rspa.1917.0015>
9. Kermack W., McKendrick A. A contribution to the mathematical theory of epidemics // *Proc. R. Soc.* 1927. Vol. A115. P. 700–721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
10. Шабунин А. В. Гибридная SIRS-модель распространения инфекций // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2022. Т. 30, № 6. С. 717–731. <https://doi.org/10.18500/0869-6632003014>
11. Anderson R. M., May R. M. The population dynamics of microparasites and their invertebrate hosts // *Phil. Trans. R. Soc.* 1981. Vol. B291. P. 451–524.
12. Anderson R. M., May R. M. The invasion, persistence and spread of infectious diseases with animal and plant communities // *Phil. Trans. R. Soc.* 1986. Vol. B314, № 3. P. 533–570.
13. Павловский И. П., Суслин В. М. Стохастическая модель эволюции популяции в пространстве // *Математическое моделирование*. 1994. Т. 6. С. 9–24.
14. Allen L. J. S., Burgin A. M. Comparison of Deterministic and Stochastic SIS and SIR Models in Discrete Time // *Mathematical Biosciences*. 2000. Vol. 163. P. 1–33. [https://doi.org/10.1016/S0025-5564\(99\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0025-5564(99)00047-4)
15. Allen L. J. S. A Primer on Stochastic Epidemic Models: Formulation, Numerical Simulation, and Analysis // *Infectious Disease Modelling*. 2017. Vol. 2. P. 128–142. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2017.03.001>
16. Gibson G. J., Streftaris G., Thong D. Comparison and Assessment of Epidemic Models // *Statistical Science*. 2018. Vol. 33. P. 19–33. <https://doi.org/10.1214/17-STS615>
17. Boccara N., Cheong K. Automata network SIR models for the spread of infectious diseases in populations of moving individuals // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 1992. Vol. 25. P. 2447–2461. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/25/9/018>
18. Sirakoulis G. C., Karafyllidis I., Thanailakis A. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation // *Ecological Modelling*. 2000. Vol. 133. P. 209–223. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00294-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00294-5)
19. Шабунин А. В. SIRS-модель распространения инфекций с динамическим регулированием численности популяции: Исследование методом вероятностных клеточных автоматов // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2019. Т. 27, № 2. С. 5–20. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2019-27-2-5-20>
20. Шабунин А. В. Синхронизация процессов распространения инфекций во взаимодействующих популяциях: Моделирование решетками клеточных автоматов // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2020. Т. 28, № 4. С. 383–396. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-4-383-396>
21. Ланжевэн П. О теории броуновского движения // *Избранные труды*. М.: Издательство Академии наук СССР, 1960. С. 338–341.
22. Maki Y., Hirose H. Infectious Disease Spread Analysis Using Stochastic Differential Equations for SIR Model // 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. IEEE. 2013. P. 152–156. <https://doi.org/10.1109/ISMS.2013.13>
23. Rao F. Dynamics Analysis of a Stochastic SIR Epidemic Model // *Abstract and Applied Analysis*. 2014. Vol. 2014. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/356013>
24. Mukhsar Sani A., Abapihi B. Connection of CTMC Process, Deterministic and Stochastic Differential Equations in Modeling of Epidemics // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1899. Art. 012111. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012111>
25. Maruyama G. Continuous Markov processes and stochastic equations // *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*. 1955. Vol. 4, № 1. P. 48–90.
26. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // *Biophysical Journal*. 1961. Vol. 1. P. 445–466.
27. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulation nerve axon // *Proceedings of the IRE*. 1962. Vol. 50. P. 2061–2070. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1962.288235>

References

1. Bailey N. T. J. *The Mathematical Approach to Biology and Medicine*. London, John Wiley and Sons, 1967. 296 p. <https://doi.org/10.2307/2982529> (Russ. ed.: Moscow, Mir, 1991. 276 p.).
2. Marchuk G. I. *Mathematical Models in the Immunology: Simulation Methods and Experiments*. Moscow, Nauka, 1991. 276 p.
3. Hethcote H. W. The mathematics of infectious diseases. *SIAM Review*, 2000, vol. 42, pp. 599–653. <https://doi.org/10.1137/S0036144500371907>
4. Bazykin A. D. *Nonlinear dynamics of interconnecting populations*. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Researches Publ., 2003. 368 p.
5. Anderson R. M., May R. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. Oxford, Oxford University Press, 1991. 768 p. (Russ. ed.: Moscow, Mir, 2004. 784 p.).
6. Ross R. An application of the theory of probabilities to the study of a prioripathometry. Part I. *Proc. R. Soc.*, 1916, vol. A92, pp. 204–230. <https://doi.org/10.1098/rspa.1916.0007>
7. Ross R. An application of the theory of probabilities to the study of apriori pathometry. Part II. *Proc. R. Soc.*, 1917, vol. A93, pp. 212–225. <https://doi.org/10.1098/rspa.1917.0014>
8. Ross R., Hudson H. An application of the theory of probabilities to the study of a priori pathometry. Part III. *Proc. R. Soc.*, 1917, vol. A93, pp. 225–240. <https://doi.org/10.1098/rspa.1917.0015>
9. Kermack W., McKendrick A. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc. R. Soc.*, 1927, vol. A115, pp. 700–721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>



10. Shabunin A. V. Hybrid SIRS model of infection spread. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 30, no. 6, pp. 717–731 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003014>
11. Anderson R. M., May R. M. The population dynamics of microparasites and their invertebrate hosts. *Phil. Trans. R. Soc.*, 1981, vol. B291, pp. 451–524.
12. Anderson R. M., May R. M. The invasion, persistence and spread of infectious diseases with animal and plant communities. *Phil. Trans. R. Soc.*, 1986, vol. B314, pp. 533–570.
13. Pavlovsky I. P., Suslin V. M. A stochastic model of population evolution in the space. *Mathematical Modeling*, 1994, vol. 6, no. 3, pp. 9–24.
14. Allen L. J. S., Burgin A. M. Comparison of Deterministic and Stochastic SIS and SIR Models in Discrete Time. *Mathematical Biosciences*, 2000, vol. 163, pp. 1–33. [https://doi.org/10.1016/S0025-5564\(99\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0025-5564(99)00047-4)
15. Allen L. J. S. A Primer on Stochastic Epidemic Models: Formulation, Numerical Simulation, and Analysis. *Infectious Disease Modeling*, 2017, vol. 2, pp. 128–142. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2017.03.001>
16. Gibson G. J., Streftaris G., Thong D. Comparison and Assessment of Epidemic Models. *Statistical Science*, 2018, vol. 33, pp. 19–33. <https://doi.org/10.1214/17-STS615>
17. Boccaro N., Cheong K. Automata network SIR models for the spread of infectious diseases in populations of moving individuals. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1992, vol. 25, pp. 2447–2461. <https://doi.org/10.1088/03054470/25/9/018>
18. Sirakoulis G. C., Karafyllidis I., Thanailakis A. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. *Ecological Modeling*, 2000, vol. 133, pp. 209–223. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00294-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00294-5)
19. Shabunin A. V. SIRS-model with dynamic regulation of the population: Probabilistic cellular automata approach. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 5–20 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2019-27-2-5-20>
20. Shabunin A. V. Synchronization of infections spread processes in populations interacting: Modeling by lattices of cellular automata. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 4, pp. 383–396 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-4-383-396>
21. Langevin P. About theory of brownian motion. In: *Selected works*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1960, pp. 338–341 (in Russian).
22. Maki Y., Hirose H. Infectious Disease Spread Analysis Using Stochastic Differential Equations for SIR Model. *4th International Conference on Intelligent Systems, Modeling and Simulation. IEEE*, 2013, pp. 152–156. <https://doi.org/10.1109/ISMS.2013.13>
23. Rao F. Dynamics Analysis of a Stochastic SIR Epidemic Model. *Abstract and Applied Analysis*, 2014, vol. 2014, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/356013>
24. Mukhsar Sani A., Abapihi B. Connection of CTMC Process, Deterministic and Stochastic Differential Equations in Modeling of Epidemics. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1899, art. 012111. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1899/1/012111>
25. Maruyama G. Continuous Markov processes and stochastic equations. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 1955, vol. 4, no. 1, pp. 48–90.
26. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. *Biophysical Journal*, 1961, vol. 1, pp. 445–466.
27. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulation nerve axon. *Proceedings of the IR*, 1962, vol. 50, pp. 2061–2070. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1962.288235>

Поступила в редакцию 19.07.2024; одобрена после рецензирования 17.11.2024;
принята к публикации 27.11.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 19.07.2024; approved after reviewing 17.11.2024;
accepted for publication 27.11.2024; published 31.03.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 76–85

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 76–85

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-76-85>, EDN: MATQYP

Научная статья

УДК 57.089:66.017:665.939.17:577.359



Микрогели, содержащие сывороточный белок, как новый способ терапии заболеваний мочевого пузыря и почек

О. А. Майорова^{1✉}, О. И. Гусликова¹, М. С. Савельева¹, О. А. Куликов², О. А. Иноземцева¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68

Майорова Оксана Александровна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Дистанционно управляемые системы для тераностики», oksanaamayorova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6440-3947>, AuthorID: 1001358

Гусликова Ольга Игоревна, научный сотрудник лаборатории «Дистанционно управляемые системы для тераностики», olga.gusliakova17@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8387-0711>, AuthorID: 1051902

Савельева Мария Сергеевна, младший научный сотрудник лаборатории «Дистанционно управляемые системы для тераностики», mssaveleva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2021-0462>, AuthorID: 938218

Куликов Олег Александрович, доктор медицинских наук, профессор кафедры фармакологии и клинической фармакологии с курсом фармацевтической технологии, oleg-kulikov-84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0739-3981>, AuthorID: 757521

Иноземцева Ольга Александровна, кандидат химических наук, заместитель руководителя по инновациям Научного медицинского центра, inozemtsevaoo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-8169>, AuthorID: 15371

Аннотация. Исследование охватывает биофизические аспекты применения эмульсионных микрогелей, стабилизированных изолятом сывороточного белка, для адресной доставки лекарств в органы мочевыделительной системы. Изучение профиля высвобождения модельного вещества Цианина 7, иммобилизованного в эмульсионные микрогели, продемонстрировало пролонгированный характер высвобождения в течение 72 ч. Было изучено влияние эмульсионных микрогелей на выживаемость различных культур клеток (нормальных фибробластов (L929) и клеток почек (Hek293), почечной карциномы (Renca) и карциномы мочевого пузыря (T24)), которая показала зависимость уровня цитотоксичности от типа клеток. При этом особая повышенная чувствительность к микрогелям была выявлена у культуры Hek293. Был также исследован характер накопления и распределения эмульсионных микрогелей у лабораторных мышей в зависимости от пути их введения: внутривенном или интравентральном. Эффективность накопления микрогелей в органах мочевыделительной системы (почки или мочевого пузыря) оценивалась по *in vivo* биораспределению методом прижизненной флуоресцентной визуализации. При системном введении суспензий микрогелей наблюдалось их селективное накопление не только в печени, но и в почках. Внутривентральное введение позволяло поддерживать высокую локальную концентрацию меченых Цианином 7 микрогелей в мочевом пузыре не менее 2 ч. Гистологический анализ срезов мочевого пузыря подтвердил безопасность микрогелей на основе изолята сывороточного белка для доставки лекарств в мочевой пузырь и почки. Данная система доставки на основе разработанных эмульсионных микрогелей открывает новые перспективы лечения заболеваний мочевыделительной системы с использованием как системного введения, так и малоинвазивных внутривентральных инстилляций.

Ключевые слова: внутривентральная инстиляция; мочевыделительная система; изолят сывороточного белка; системы доставки лекарственных средств; эмульсионные микрогели

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-75-10042).

Для цитирования: Майорова О. А., Гусликова О. И., Савельева М. С., Куликов О. А., Иноземцева О. А. Микрогели, содержащие сывороточный белок, как новый способ терапии заболеваний мочевого пузыря и почек // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 76–85. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-76-85>, EDN: MATQYP

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Microgels containing whey protein as a new way of treating bladder and renal diseases

O. A. Mayorova^{1✉}, O. I. Gusliakova¹, M. S. Saveleva¹, O. A. Kulikov², O. A. Inozemtseva¹

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, , Russia

²National Research Ogarev Mordovia State University, 68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia

© Майорова О. А., Гусликова О. И., Савельева М. С., Куликов О. А., Иноземцева О. А., 2025



Oksana A. Mayorova, oksanaamayorova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6440-3947>, AuthorID: 1001358

Olga I. Gusliakova, olga.gusliakova17@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8387-0711>, AuthorID: 1051902

Mariia S. Saveleva, mssaveleva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2021-0462>, AuthorID: 938218

Oleg A. Kulikov, oleg-kulikov-84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0739-3981>, AuthorID: 757521

Olga A. Inozemtseva, inozemtseva00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-8169>, AuthorID: 15371

Abstract. Background and Objectives: This study covers the biophysical aspects of the use of emulsion microgels stabilized with whey protein isolate (WPI) for targeted drug delivery to the urinary system. Emulsion microgels were prepared by the ultrasonic homogenization method which leads to denaturation of the WPI adsorbed on the water-oil interface and formation of WPI microgel layer at the oil droplet. **Materials and Methods:** The study of the release profile of the model substance Cyanine 7 immobilized in emulsion microgels has demonstrated a prolonged pattern over 72 hours. The effect of emulsion microgels on the viability of various cell cultures (normal fibroblasts (L929), kidney cells (Hek239), renal carcinoma (Renca) and bladder carcinoma (T24)) has been studied, which has shown a dependence of the cytotoxicity level on the cell type. The Hek239 cells have demonstrated particularly increased sensitivity to emulsion microgels. **Results:** The accumulation and distribution behaviour of emulsion microgels in laboratory mice have also been studied depending on the route of their administration: intravesical or intravenous. The efficiency of targeting the microgels for urinary system components of the urinary system (kidney or bladder) has been assessed by biodistribution using *in vivo* fluorescence imaging. Systemic administration has demonstrated selective accumulation not only in the liver but also in the kidneys. Intravesical administration has made it possible to maintain a high local concentration of Cyanine 7 in the bladder at least during 2 h. Histological analysis has validated the safety of WPI-based microgels for delivery into the bladder and kidney. **Conclusions:** The presented delivery system based on the developed emulsion microgels opens up new prospects for the treatment of diseases of the urinary system using both systemic administration and minimally invasive intravesical instillations.

Keywords: intravesical instillation; urinary system; whey protein isolate; drug delivery systems; emulsion microgels

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-75-10042).

For citation: Mayorova O. A., Gusliakova O. I., Saveleva M. S., Kulikov O. A., Inozemtseva O. A. Microgels containing whey protein as a new way of treating bladder and renal diseases. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 76–85 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-76-85>, EDN: MATQYP

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Заболевания мочевыделительной системы, такие как инфекции мочевого пузыря и заболевания почек, тесно взаимосвязаны. Отсутствие должного лечения или прогрессирование в хроническую форму заболевания одного из органов может негативно сказаться на всей системе в целом. Инфекции часто проникают из нижних отделов мочевыделительной системы в мочеточники и почки. Например, прогрессирование цистита может привести к острому пиелонефриту [1, 2]. Кроме того, существует корреляция между дисфункцией мочевыводящих путей и воспалением, а также риском развития рака мочевого пузыря и почек [3–5]. Несвоевременное начало лечения снижает иммунный ответ, что может привести к опасным для жизни последствиям. Поэтому решающее значение имеет комплексное лечение мочевыделительной системы. Распространенные методы лечения часто включают пероральное или внутривенное введение антибактериальных препаратов в высоких дозах [6–9]. Однако эти подходы не всегда дают адекватные терапевтические результаты из-за естественных функций мочевого пузыря и наличия физиологического барьера [10–13]. Это требует применения больших доз препарата, что в конечном итоге, приводит к системной токсичности и многочисленным побочным реакциям [10, 14].

Для минимизации общей токсичности лекарств и сокращения требуемых доз разрабатываются альтернативные методы доставки. Например, для терапии заболеваний мочевого пузыря используется локальная доставка лекарств в орган – внутрипузырная инстилляция. Такой способ введения лекарственных препаратов позволяет повысить дозу активного вещества в области воспаления и в то же время уменьшить возможную системную токсичность и побочные эффекты на организм. Другим способом повышения эффективности лечения, которое в настоящее время широко развито, является создание микроразмерных систем для адресации препаратов. Такие системы способны эффективно влиять на распространение инкапсулированных лекарственных средств в органах. Эмульсионные микрогели сейчас активно изучаются в области терапии органов мочевыделительной системы [15, 16]. Эмульсионные системы типа «масло-в-воде», позволяющие инкапсулировать как гидрофобные, так и гидрофильные лекарственные препараты, обладают рядом преимуществ для адресной доставки. В зависимости от конкретной цели можно создавать микроэмульсии с точными физическими и химическими свойствами, включая размер частиц, площадь поверхности, ζ-потенциал и эффективность доставки лекарственного средства в различные органы [15, 17–



19]. Кроме того, растворимость, проницаемость и всасывание инкапсулированных лекарственных средств напрямую зависят от химического состава внешнего слоя, который стабилизирует микроэмульсии [20–22]. Стабилизация масляных капель с помощью биополимеров с сильными мукоадгезивными свойствами, таких как изолят сывороточного белка (ИСБ), позволяет микроконтейнерам адгезироваться на уротелии, тем самым продлевая удержание лекарственного средства в очаге воспаления [16, 23]. Это делает микрогели на основе ИСБ перспективной системой для воздействия на различные компоненты мочевыделительной системы и требует детального изучения.

В настоящей работе мы изучили скорость высвобождения модельного вещества Цианина 7 из эмульсионных микрогелей (ЭМ), стабилизированных изолятом сывороточного белка. Мы исследовали их токсичность на различных типах клеточных культур, а именно на нормальных фибробластах (L929) и клетках почек (Hek293), почечной карциноме (Rena) и карциноме мочевого пузыря (T24). Кроме того, мы оценили кинетику перераспределения разработанных микрогелей *in vivo* с применением флуоресцентной томографии при внутривенном и внутрипузырном методах введения. Также мы проанализировали их влияние на морфологическое состояние целевых органов (мочевого пузыря и почек) с помощью классического гистологического анализа.

1. Материалы и методы

1.1. Материалы

Льняное масло было предоставлено местным поставщиком OLEOS® (Россия), изолят сывороточного белка (ИСБ, WPI) был произведен компанией California Gold Nutrition® (США). NHS-эфир Цианина 7 (Cy7) был приобретен в компании Lumiprobe (Россия). Диметилсульфоксид (ДМСО), этанол 96% и изопропиловый спирт (ИПС) были приобретены в компании ЭкоХимАналит (Россия), парафин-парапласт (Normal) был приобретен в компании МиниМед (Россия). NaCl был приобретен у компании Sigma-Aldrich (США). Гематоксилин и эозин были приобретены у компании Биовитрум (Россия).

Модифицированная среда Eagle (DMEM), среда Roswell Park Memorial Institute (RPMI-

1640), фетальная бычья сыворотка (FBS), пенициллин-стрептомицин (10 000 ед/мл), физиологический раствор с фосфатным буфером без ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} и трипсин-ЭДТА (0.25%) с добавлением фенолового красного были приобретены у компании Gibco (Paisley, Великобритания). Для МТТ-анализа жизнеспособности клеток использовался тетразолийбромид тиазолилового синего производства ДиаЭМ (Россия).

Деионизованная вода Milli-Q (18.2 мкСм/см) была получена из системы фильтрации Millipore (Merck, Германия) и использовалась во всех экспериментах.

1.2. Получение эмульсионных микрогелей

Эмульсионные микрогели, стабилизированные ИСБ-Су7, были приготовлены в соотношении ИСБ:масло – 1 : 3 (по массе) в соответствии с протоколом, описанным [16]. Водную фазу готовили путем растворения ИСБ в 0.9% NaCl в концентрации 5% (по массе). ИСБ, конъюгированный с Су 7 (ИСБ-Су7), был приготовлен по протоколу, описанному нами ранее [16]. Смесь гидрофильной и гидрофобной фаз в соотношении 1 : 3 гомогенизировали с использованием ультразвукового гомогенизатора Bandelin Sonopuls HD 2070 (Германия) в течение 1 мин при частоте 20 кГц и высокой плотности 1 Вт/см². После завершения гомогенизации полученные эмульсионные микрогели центрифугировали при 12000 об/мин в течение 5 мин для отделения дисперсионной среды, при этом водную фазу отбирали и сохраняли для дальнейшего спектрофотометрического анализа. Оставшуюся масляную фазу заливали эквивалентным объемом свежего физиологического раствора 0.9% NaCl и повторно гомогенизировали. Полученные эмульсионные микрогели хранили в холодильнике при температуре +4°C.

Для определения количества ИСБ-Су7, содержащегося в полученных эмульсионных микрогелях, супернатанты после центрифугирования анализировали спектрофотометрически с помощью микропланшетного ридера CLARIO Star Plus (BMG Labtech, Германия). Для этого супернатанты разбавляли эквивалентным объемом этанола (70%) для растворения остаточного масла и осаждения остаточного белка. Смесь центрифугировали при 12000 об/мин, затем отделяли жидкую фазу. Затем измеряли оптическую плотность полученного раствора в 96-луночных микропланшетах Costar в диапазоне 200–1000 нм.



Максимум поглощения для ИСБ-Су7 был зарегистрирован при 680 нм. Количество ИСБ-Су7 в растворах рассчитывали с помощью соответствующего градуировочного графика. Эффективность загрузки (LC, %) ИСБ-Су7 в эмульсиях рассчитывали по формуле

$$LC(\%) = \frac{M_{\text{исход}} - M_{\text{раст}}}{M_{\text{раст}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $M_{\text{исход}}$ – количество Су7 в исходном растворе ИСБ-Су7; $M_{\text{раст}}$ – общее количество Су7 в растворах, полученных после фильтрации эмульсионных микрогелей.

1.3. Оптическая микроскопия

Расчет среднего размера капель эмульсии проводили методом оптической визуализации с использованием инвертированного микроскопа Olympus IX73 (Olympus, Япония) и объектива 40×. Для этого было проанализировано не менее 100 измерений и 5 изображений для каждого образца. Для обработки изображений и статистики использовалось программное обеспечение Image J [24]. Результаты были представлены в следующем виде: среднее значение \pm стандартное отклонение.

1.4. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия

Флуоресцентные свойства подготовленных образцов эмульсии исследовали с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа (КЛСМ) Leica TCS SP8 X (Leica Microsystems, Германия), оснащенного твердотельными лазерами с диодной накачкой. Образцы снимали через объектив 20×/0.70 NA. Флуоресценция Су7 возбуждалась лазером с длиной волны 671 нм, излучение регистрировалось при длине волны 730–795 нм (зеленый цвет на изображениях).

1.5. Исследование высвобождения Су7 в модельной среде *in vitro*

В исследованиях кинетики выделения *in vitro* использовался физиологический раствор 0.9% NaCl.

Модельную среду (1 мл) добавляли к 1 мл суспензии эмульсионных микрогелей, помещенной в пробирку типа Эппендорф объемом 2 мл. Образцы инкубировали в термошейкере (Thermo Scientific, США) при комнатной температуре (+22°C) и непрерывном встряхивании (600 об/мин). В определенные моменты времени

образцы вынимались из термошейкера и подвергались центрифугированию в течение 3 мин при 12000 об/мин. В результате происходило разделение раствора эмульсионных микрогелей на водную и масляную фазы. Из образцов отбирали 1 мл водной фазы с помощью шприцевой иглы. После этого в пробирку с образцом добавляли 1 мл свежей модельной среды, интенсивно перемешивали на вибрационном встряхивателе Vortex (Elmi, Латвия) до однородного состояния и возвращали в термошейкер.

Полученные пробы разбавляли 1 мл этанола (70%) для растворения остаточного масла и осаждения остаточного белка. Смесь центрифугировали при 12000 об/мин, затем отделяли жидкую фазу и анализировали спектрофотометрически с помощью микропланшетного ридера CLARIO Star Plus (BMG Labtech, Германия). Для каждой временной точки проводили 3 независимые измерения. Для определения концентраций высвобождаемого конъюгата ИСБ-Су7 измеряли оптическую плотность полученных растворов в 96-луночных микропланшетах Costar в диапазоне 200–1000 нм (максимум поглощения для ИСБ-Су7 – 680 нм).

1.6. Клеточные эксперименты

Для предварительной оценки безопасности эмульсионных микрогелей в живой системе в качестве модели *in vitro* были использованы следующие клеточные линии: нормальные фибробласты мыши (L929), первичные эмбриональные клетки почек человека (Hek 239), эпителиальные клетки карциномы почки мыши (RenCa) и эпителиальные клетки карциномы мочевого пузыря человека (T24). Для культивирования клеток RenCa и T24 использовали среду RPMI-1640 с 10% FBS и 1% пенициллин-стрептомицином. Среду DMEM (10% FBS, 1% пенициллин-стрептомицин) использовали для культивирования L929 и Hek 239. Среду заменяли каждые 3 дня, а клетки выдерживали в увлажненном инкубаторе при 5% CO₂ и 37°C. Культивирование проводилось в соответствии с протоколом ATCC [25].

1.7. Тесты на цитотоксичность

Клеточные линии L929, Hek 239, RenCa и T24 культивировали в 96-луночных планшетах (5 · 10³ клетки на лунку) и инкубировали 12 ч при 5% CO₂ и 37°C. Затем в лунки добавляли эмульсию микрогелей в концентрациях 10, 50, 100 и 200 частиц на клетку в 300 мкл питательной



среды. Через 72 ч после инкубации культуральную среду с микрогелями удаляли. В каждую лунку добавляли по 100 мкл свежей питательной среды с 10%-ным исходным раствором для МТТ (5 мг/мкл в буфере DPBS). Затем планшет инкубировали при 37°C в течение 3 ч. Далее из каждой лунки удаляли среду с МТТ и добавляли в каждую лунку по 100 мкл ДМСО (инкубация при 37°C в течение 15 мин). Оптическую плотность измеряли при длине волны 554 нм с помощью спектрометра ClarioSTAR Plus (BMG Labtech, Ортенберг, Германия).

1.8. Эксперименты с животными

Экспериментальные манипуляции с лабораторными животными проводились в соответствии с протоколом № 7, утвержденным комитетом по этике Саратовского государственного медицинского университета 7 февраля 2023 года, и Женевской конвенцией (Международное руководство по проведению биомедицинских исследований с участием животных, 1985). Эксперимент проводился на самках мышей линии Balb/c (возраст 6–8 недель, вес 20–25 г). Животные были разделены на 3 группы, по 3 мыши в каждой:

1-я экспериментальная группа – системное введение (внутривенная инъекция);

2-я экспериментальная группа – внутрипузырное введение;

3-я контрольная группа – интактные животные.

Перед всеми экспериментальными процедурами животных анестезировали внутрибрюшинно путем инъекции смеси из 50 мкл Золетила (40 мг/кг, Virbac SA, Carros, Франция) и 10 мкл 2% раствора Рометара (10 мг/кг, Spofa, Чехия).

Исследование биораспределения эмульсионных микрогелей *in vivo*

Флуоресцентная визуализация *in vivo* была проведена с целью изучения распределения эмульсионных микрогелей у животных. 50 мкл эмульсионных микрогелей, суспендированных в 0.9% растворе NaCl с концентрацией $50 \cdot 10^6$ частиц, вводили животным через хвостовую вену и внутрипузырно. Флуоресцентную визуализацию биораспределения микрогелей *in vivo* проводили с использованием системы визуализации IVIS SpectrumCT *In Vivo* (PerkinElmer, Уолтем, Массачусетс, США), длина волны возбуждения/излучения 745/800 нм. За каждой мышью наблюдали до введения и в определенные временные

точки после введения суспензии микрогелей (30 мин и 2 ч). Результаты были проанализированы с использованием программного обеспечения Living Image 4.7.3.

Гистологические исследования

По завершению экспериментов, был проведен гистологический анализ для определения патологических изменений в мочевом пузыре и почках через 5 дней после введения эмульсии микрогелей через хвостовую вену и внутрипузырную инстилляцию. Животных подвергали эвтаназии в результате передозировки анестетика. Для гистологического исследования были извлечены необходимые образцы тканей, которые фиксировали в нейтральном формалине в течение 24 ч. Затем образцы высушивали дегидратированным изопропиловым спиртом, заливали в парафин и изготавливали микросрезы тканей толщиной 5 мкм. Микросрезы окрашивали гематоксилином и эозином (Биовитрум, Россия). Морфологическая оценка срезов проводилась с помощью световой микроскопии.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Характеризация эмульсионных микрогелей и скорости высвобождения из них Цианина 7

Микрогели по типу эмульсии «масло-в-воде», стабилизированные ИСБ, были приготовлены с использованием ранее разработанного протокола [16]. Стабилизирующие и эмульгирующие свойства ИСБ хорошо зарекомендовали себя для приготовления эмульсионных систем [26, 27].

Для возможности визуализации эмульсионных микрогелей методом КЛСМ, в состав оболочки микрогелей был включен ИСБ, конъюгированный с флуоресцентным красителем Су7. Су7 также был выбран из-за удобства его использования для прижизненной биовизуализации. Средний диаметр эмульсионных капель, стабилизированных ИСБ, по данным оптической микроскопии составил 3.7 ± 0.2 мкм. Эффективность инкапсуляции Су7 в эмульсионные микрогели составила $55.5 \pm 0.1\%$. Согласно данным КЛСМ (рис. 1, А), полученные эмульсионные микрогели обладают яркой флуоресценцией, четко визуализируется оболочка ИСБ, окрашенная Су7 (зеленый цвет). Отчетливо видна граница раздела фаз между масляной и водной фазами, на которой локализован амфифильный ИСБ-Су7 (рис. 1, А), что подтверждает образование эмульсионной системы «масло-в-воде».

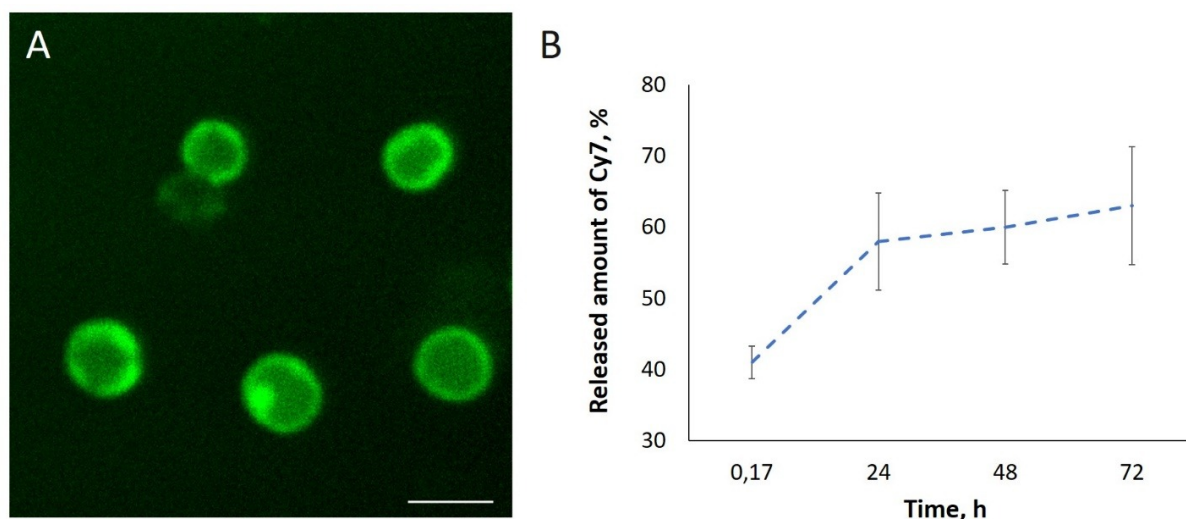


Рис. 1. КЛСМ изображение эмульсионных микрогелей, стабилизированных ИСБ-Су7. Масштабная линейка 3 мкм (А). Кинетика высвобождения Су7 из микрогелей в физиологическом растворе (0.9% NaCl). Данные представлены в виде среднего значения \pm стандартное отклонение, рассчитанного по трем измерениям для каждого образца (В) (цвет онлайн)
 Fig. 1. CLSM image of emulsion microgels stabilized with WPI-Cy7. The scale bar corresponds to 3 μ m (A). Kinetics of Cy7 release from microgels in physiological solution (0.9% NaCl). Data are presented as the mean \pm standard deviation calculated from three measurements for each sample (B) (color online)

Изучение поведения эмульсионных микрогелей в моделируемых средах, таких как физиологический раствор, имеет большое значение для понимания особенностей их применения для терапии мочевыделительной системы. Для оценки стабильности исследуемой системы был изучен процесс высвобождения конъюгата ИСБ-Су7 из оболочек эмульсионных микрогелей при их инкубации в физиологическом растворе 0.9% NaCl в течение 72 ч ($+22^{\circ}\text{C}$, 600 об/мин). Высвобождение ИСБ-Су7, который входит в состав оболочек микрогелей, является индикатором процесса их деградации.

Зависимость массовой концентрации Су7, высвобожденного в процессе инкубирования в физиологическом растворе из эмульсионных микрогелей в физиологическом растворе 0.9% NaCl показана на рис. 1, В. Кинетика высвобождения красителя показывает стабильный и продолжительный процесс высвобождения Су7 и составляет $\sim 60\%$ через 72 часа после начала эксперимента.

Таким образом, можно сделать вывод, что эмульсионные микрогели, стабилизированные ИСБ, способны удерживать 40% модельного вещества в течение как минимум 72 ч. Поэтому во всех экспериментах *in vitro* и *in vivo* использовались только свежеприготовленные эмульсионные микрогели.

2.2. Исследование цитотоксичности микрогелей на основе ИСБ

Следующим этапом исследования была оценка цитотоксичности эмульсионных микрогелей ИСБ-Су7 (соотношение 0, 10, 50, 100 и 200 частиц на клетку) для различных типов клеток (рис. 2). В качестве модели были выбраны клеточные линии фибробластов мыши L929, первичная культура Нек239, а также опухолевые клеточные линии RenCa и T24.

Показано, что разработанные эмульсионные микрогели на основе ИСБ-Су7 обладают низкой цитотоксичностью для различных типов культур даже при высокой концентрации (рис. 2). Снижение метаболической активности менее 70%, говорящее о существенном токсическом действии [28], достоверно регистрировалось только для нормальных клеток почки при добавлении микрогелей во всех исследованных соотношениях микрогелей на клетку.

2.3. Динамика биораспределения и миграции флуоресцентного красителя Су7, инкапсулированного в микрогели, после их внутривенного введения и внутрипузырной инстилляции

На следующем этапе исследования была детально оценена эффективность накопления и миграция флуоресцентного сигнала в органах мочевыделительной системы с использованием

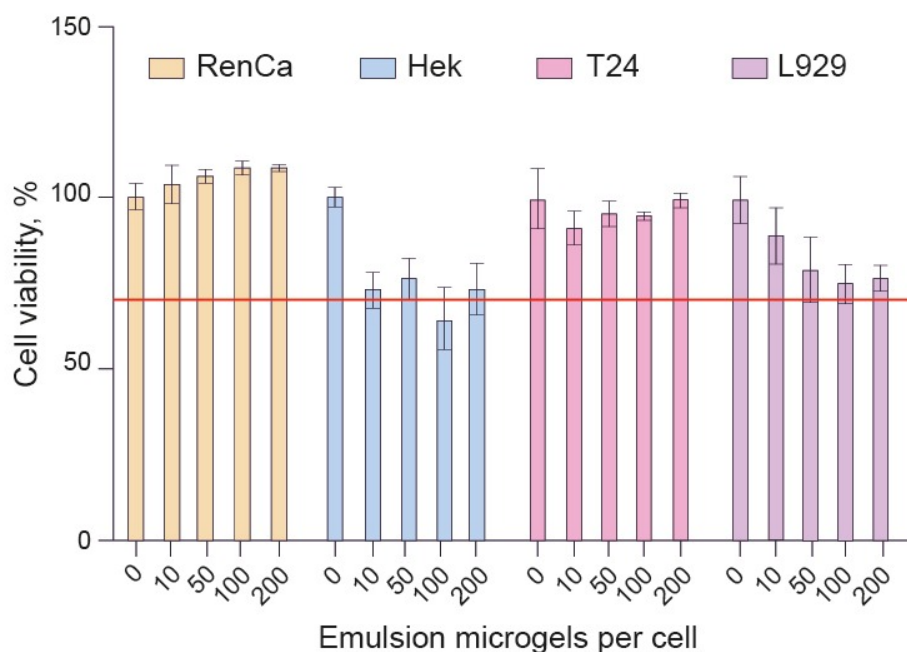


Рис. 2. Оценка цитотоксичности эмульсионных микрогелей ИСБ-Су7 для различных клеточных линий. Данные представлены в виде среднего значения \pm стандартное отклонение, рассчитанного по шести независимым измерениям для каждого образца (цвет онлайн)

Fig. 2. Cell viability of different cell lines when incubated with emulsion microgels WPI-Cy7. Data are presented as the mean \pm standard deviation calculated from six measurements for each sample (color online)

различных методов введения микрогеля: системного (внутривенного) и целенаправленного (внутрипузырного) (рис. 3).

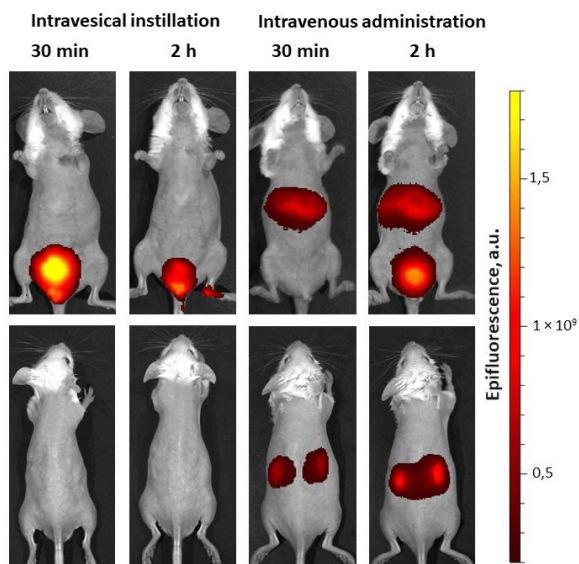


Рис. 3. Биораспределение суспензии эмульсионных микрогелей, стабилизированных ИСБ-Су7, после внутривенного и внутрипузырного введения *in vivo* (цвет онлайн)

Fig. 3. Biodistribution of microgel suspensions stabilized by WPI-Cy7 after intravenous and intravesical administration *in vivo* (color online)

У животных, получавших суспензию микрогелей внутрипузырно, яркий флуоресцентный сигнал был сосредоточен главным образом в области мочевого пузыря в течение как минимум 2 ч с тенденцией к снижению флуоресценции, связанной, главным образом, с мочеиспусканием.

В то же время при системном (внутривенном) введении микрогелей на основе ИСБ через хвостовую вену флуоресцентный сигнал накапливался в основном не только в печени, но и в почках. Ко второму часу исследования, наблюдалась тенденция к постепенному увеличению флуоресцентного сигнала в печени и почках, а также миграция сигнала в область мочевого пузыря. Такая тенденция, вероятно, связана с началом деградации и выведения компонентов микрогелей через мочевыделительную систему.

Обнаруженный феномен накопления микрогелей на основе ИСБ в почках после системного введения является нетипичным биораспределением для эмульсий типа «масло-в-воде» микронного размера [29–31]. В целом представленные результаты свидетельствуют о том, что ИСБ является хорошим кандидатом для адресной терапии заболеваний мочевыделительной системы



при различных способах введения их в организм [16, 32].

2.4. Морфологическое состояние мочевого пузыря и почек через 5 дней после введения микрогелей через хвостовую вену и внутрипузырную инстилляцию

Поскольку гелевые эмульсии представляют собой масляные частицы микронного размера, то их безопасность при внутривенном введении остается чрезвычайно важной из-за риска эмболизации кровеносных сосудов [33, 34]. В связи с этим на последнем этапе исследования была

проведена оценка морфологического состояния органов мочевыделительной системы – мочевого пузыря и почек.

Гистологический анализ был проведен на 5-й день после введения микрогелей в организм. Этого времени достаточно, чтобы оценить как острое, так и замедленное воздействие микрогелей на ткани. Результаты гистологического исследования представлены на рис. 4. В тканях исследуемых органов не наблюдалось деструктивных или ишемических изменений, связанных с эмболизацией. Также не было выявлено признаков развития воспалительного процесса или

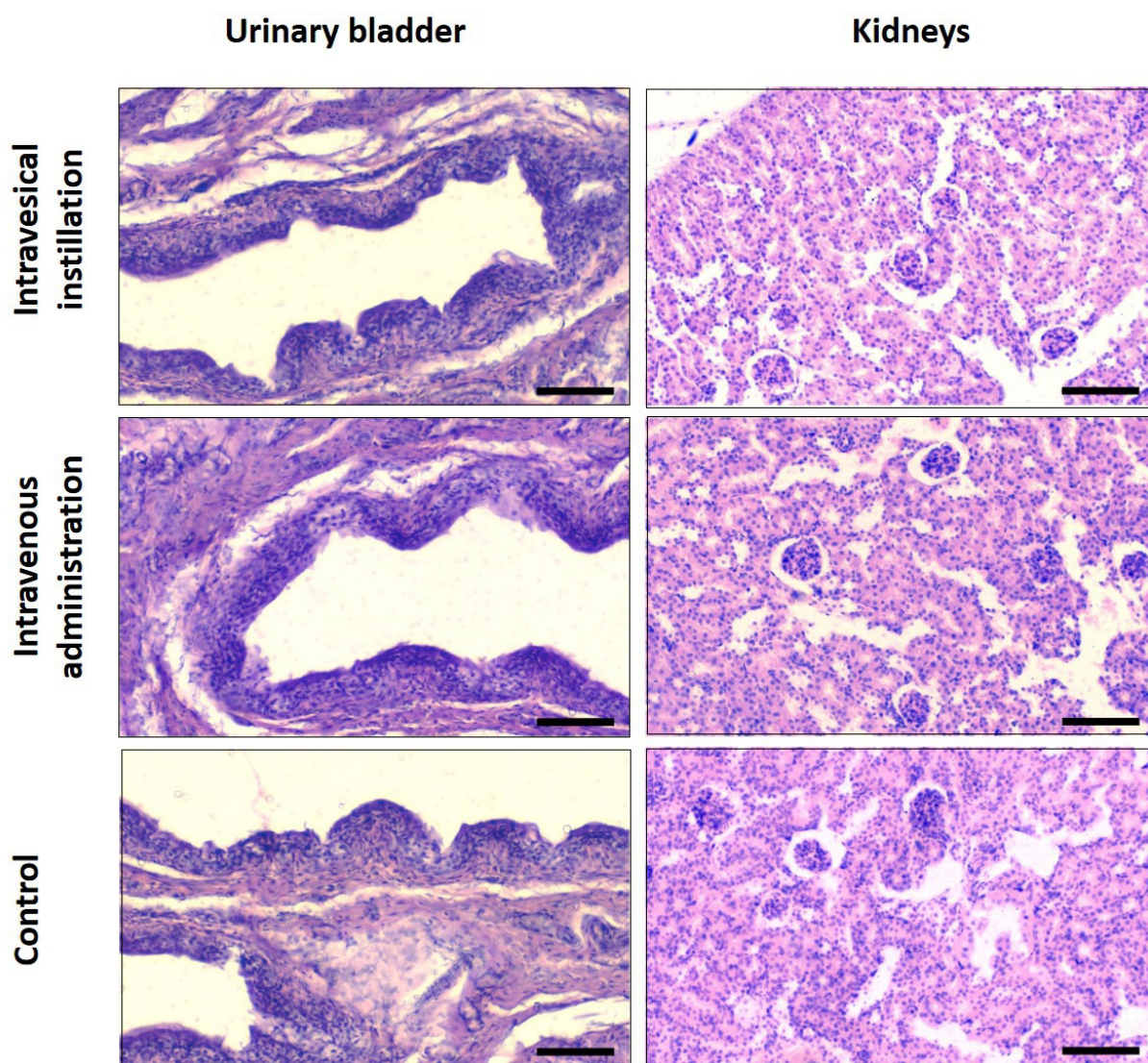


Рис. 4. Изображения гистологических срезов тканей мочевого пузыря и почек intactных мышей (контроль) и мышей через 5 дней после внутривенного и внутрипузырного введения эмульсионных микрогелей ИСБ-Су7. Толщина микро-срезов составляет 5 мкм; масштабная линейка 200 мкм (цвет онлайн)

Fig. 4. Histological images of bladder and kidney tissues of the intact mice (control) and mice 5 days after intravenous and intravesical injection of emulsion microgels WPI-Cy7. The thickness of the microsections is 5 μm ; the scale bar is 200 μm (color online)



иммунного ответа. Все исследованные ткани и органы имели нормальное морфологическое состояние, сопоставимое с тканями интактных животных.

Представленные данные свидетельствуют о безопасности применения микрогелевых эмульсий на основе ИСБ для внутривезикулярного или внутривенного введения в выбранной дозировке.

Выводы

Проведенное исследование было сосредоточено на характеристике микрогелей типа «масло-в-воде», стабилизированных ИСБ, и изучении скорости высвобождения инкапсулированного флуоресцентного вещества из их оболочек, а также на безопасности разработанных систем *in vitro* и биологического их распределения *in vivo*. Эмульсионные микрогели обладали ярким флуоресцентным сигналом от ИСБ-Су7, формирующего их оболочку, и были способны удерживать 40% модельного вещества в течение как минимум 72 ч при инкубации в физиологическом растворе.

Исследование цитотоксичности синтезированных микрогелей выявило отсутствие значительного негативного влияния для клеток линий L929, Renca и T-24. Однако клеточная линия Нек 239 (нормальные клетки почки) демонстрировала повышенную чувствительность и снижение метаболической активности при всех исследованных концентрациях.

Изучение биораспределения после системного введения белым мышам выявило накопление микрогелей не только в печени, но и в почках, что является нетипичным для других систем типа «масло-в-воде». Внутривезикулярное введение продемонстрировало потенциал направленной терапии при заболеваниях мочевого пузыря.

Гистологический анализ органов мочевыделительной системы белых мышей через 5 дней после введения подтвердил безопасность микрогелей на основе ИСБ. В мочевом пузыре и почках не наблюдалось эмболических осложнений, воспалительных реакций или морфологических аномалий, даже несмотря на выявленный цитотоксический эффект для линии Нек 239 в *in vitro* эксперименте. Это подчеркивает потенциальную клиническую значимость микрогелей на основе ИСБ для терапии органов мочевыделительной системы, их безопасность как для внутривезикулярного, так и для внутривенного введения в протестированной дозировке.

Список литературы / References

1. Kolman K. B. Cystitis and Pyelonephritis. *Prim. Care Clin. Off. Pract.*, 2019, vol. 46, pp. 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.pop.2019.01.001>
2. Jansåker F., Li X., Vik I., Frimodt-Møller N., Knudsen J. D., Sundquist K. The Risk of Pyelonephritis Following Uncomplicated Cystitis: A Nationwide Primary Healthcare Study. *Antibiotics*, 2022, vol. 11, iss. 12, art. 1695. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11121695>
3. Jhamb M., Lin J., Ballow R., Kamat A. M., Grossman H. B., Wu X. Urinary tract diseases and bladder cancer risk: A case-control study. *Cancer Causes Control*, 2007, vol. 18, pp. 839–845. <https://doi.org/10.1007/s10552-007-9028-2>
4. Kantor F., Hartge P., Hoover R. N., Narayana A. S., Sullivan J. W., Fraumeni J. F. Urinary tract infection and risk of bladder cancer. *Am. J. Epidemiol.*, 1984, vol. 119, pp. 510–515. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a113768>
5. Maisonneuve P., Agodoa L., Gellert R., Stewart J. H., Bucciante G., Lowenfels A. B., Wolf R. A., Jones E., Dsiney A. P., Briggs D., McCredie M., Boyle P. Cancer in patients on dialysis for end-stage renal disease: An international collaborative study. *Lancet*, 1999, vol. 354, pp. 93–99. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(99\)06154-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(99)06154-1)
6. Gupta K., Hooton T. M., Naber K. G., Wullt B., Colgan R., Miller L. G., Moran G. J., Nicolle L. E., Raz R., Schaeffer A. J., Soper D. E. International Clinical Practice Guidelines for the Treatment of Acute Uncomplicated Cystitis and Pyelonephritis in Women: A 2010 Update by the Infectious Diseases Society of America and the European Society for Microbiology and Infectious Diseases. *Clin. Infect. Dis.*, 2011, vol. 52, pp. e103–e120. <https://doi.org/10.1093/cid/ciq257>
7. Rădulescu A., Mădan V., Aungurenci A., Bratu O., Farcaș C., Dinu M., Mischianu D. Antibiotic resistant urinary tract infections in an urology ward. *Rom. J. Mil. Med.*, 2015, vol. 118, pp. 20–22.
8. Pietrucha-Dilanchian P., Hooton T. M. Diagnosis, Treatment, and Prevention of Urinary Tract Infection. *Microbiol. Spectr.*, 2016, vol. 4, no. 6, art. uti-0021-2015. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.UTI-0021-2015>
9. Kallen A. J., Welch H. G., Sirovich B. E. Current Antibiotic Therapy for Isolated Urinary Tract Infections in Women. *Arch. Intern. Med.*, 2006, vol. 166, iss. 6, pp. 635–639. <https://doi.org/10.1001/archinte.166.6.635>
10. Hsu C., Chuang Y., Chancellor M. B. Intravesical drug delivery for dysfunctional bladder. *Int. J. Urol.*, 2013, vol. 20, pp. 552–562. <https://doi.org/10.1111/iju.12085>
11. Ramakrishnan V. M., Eswara J. R. Basic Bladder Physiology and Anatomy. In: Stiffel J. T., Dray E. V., eds. *Urological Care for Patients with Progressive Neurological Conditions*. Cham, Springer, 2020, pp. 7–15. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23277-1_2
12. Min G., Zhou G., Schapira M., Sun T.-T., Kong X.-P. Structural basis of urothelial permeability barrier function as revealed by Cryo-EM studies of the 16 nm uroplakin particle. *J. Cell Sci.*, 2003, vol. 116, pp. 4087–4094. <https://doi.org/10.1242/jcs.00811>



13. Irwin D. E., Kopp Z. S., Agatep B., Milsom I., Abrams P. Worldwide prevalence estimates of lower urinary tract symptoms, overactive bladder, urinary incontinence and bladder outlet obstruction. *BJU Int.*, 2011, vol. 108, pp. 1132–1138. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2010.09993.x>
14. Tyagi P., Tyagi S., Kaufman J., Huang L., Miguel F. de Local Drug Delivery to Bladder Using Technology Innovations. *Urol. Clin. North Am.*, 2006, vol. 33, pp. 519–530. <https://doi.org/10.1016/j.ucl.2006.06.012>
15. Fang J., Wu P., Fang C., Chen C. Intravesical delivery of 5-aminolevulinic acid from water-in-oil nano/submicron-emulsion systems. *J. Pharm. Sci.*, 2010, vol. 99, pp. 2375–2385. <https://doi.org/10.1002/jps.22006>
16. Saveleva M. S., Lobanov M. E., Gusliakova O. I., Plastun V. O., Prikhozhenko E. S., Sindeeva O. A., Gorin D. A., Mayorova O. A. Mucoadhesive Emulsion Microgels for Intravesical Drug Delivery: Preparation, Retention at Urothelium, and Biodistribution Study. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, vol. 15, iss. 21, pp. 25354–25368. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c02741>
17. Chen T.-Y., Tai Y.-Y., Chang L.-C., Wu P.-C. Fabrication, optimisation and evaluation of cisplatin-loaded nanostructured carriers for improved urothelium permeability for intravesical administration. *J. Microencapsul.*, 2021, vol. 38, pp. 405–413. <https://doi.org/10.1080/02652048.2021.1957037>
18. Cannon J. B., Shi Y., Gupta P. Emulsions, microemulsions, and lipid-based drug delivery systems for drug solubilization and delivery—Part I: Parenteral applications. In: Liu R., ed. *Water-insoluble drug formulation*. CRC Press, 2018, pp. 211–245. <https://doi.org/10.1201/9781315120492-10>
19. Singh Y., Meher J. G., Raval K., Khan F. A., Chaurasia M., Jain N. K., Chourasia M. K. Nanoemulsion: Concepts, development and applications in drug delivery. *J. Control. Release*, 2017, vol. 252, pp. 28–49. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.03.008>
20. Simovic S., Prestidge C. A. Nanoparticle layers controlling drug release from emulsions. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 2007, vol. 67, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2007.01.011>
21. Buyukozturk F., Benneyan J. C., Carrier R. L. Impact of emulsion-based drug delivery systems on intestinal permeability and drug release kinetics. *J. Control. Release*, 2010, vol. 142, pp. 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2009.10.005>
22. Ming Y., Xia Y., Ma G. Aggregating particles on the O/W interface: Tuning Pickering emulsion for the enhanced drug delivery systems. *Aggregate*, 2022, vol. 3, iss. 2, art. e162. <https://doi.org/10.1002/agt2.162>
23. Tyagi P., Wu P.-C., Chancellor M., Yoshimura N., Huang L. Recent Advances in Intravesical Drug/Gene Delivery. *Mol. Pharm.*, 2006, vol. 3, pp. 369–379. <https://doi.org/10.1021/mp060001j>
24. Schneider C. A., Rasband W. S., Eliceiri K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat. Methods*, 2012, vol. 9, pp. 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
25. *Animal Cell Culture Guide*. Available at: <https://www.atcc.org/resources/culture-guides/animal-cell-culture-guide> (accessed September 1, 2024).
26. Ostojić S., Pavlović M., Živić M., Filipović Z., Gorjanović S., Hranisavljević S., Dojčinović M. Processing of whey from dairy industry waste. *Environ. Chem. Lett.*, 2005, vol. 3, pp. 29–32. <https://doi.org/10.1007/s10311-005-0108-9>
27. Armetha V., Hariyadi P., Sitanggang A. B., Yuliani S. The stability of whey protein-stabilized red palm oil emulsion from a rheological perspective. *Ann. Univ. Dunarea Jos Galati. Fascicle VI – Food Technol.*, 2022, vol. 46, pp. 35–49. <https://doi.org/10.35219/foodtechnology.2022.2.03>
28. Standard I. *Biological evaluation of medical devices – Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity*. Geneve, Switzerland, International Organization for Standardization, 2023, pp. 1–11.
29. Sakaeda T., Hirano K. O/W Lipid Emulsions for Parenteral Drug Delivery. III. Lipophilicity Necessary for Incorporation in Oil Particles Even After Intravenous Injection. *J. Drug Target.*, 1998, vol. 6, pp. 119–127. <https://doi.org/10.3109/10611869808997887>
30. Hippalgaonkar K., Majumdar S., Kansara V. Injectable Lipid Emulsions—Advancements, Opportunities and Challenges. *AAPS PharmSciTech*, 2010, vol. 11, pp. 1526–1540. <https://doi.org/10.1208/s12249-010-9526-5>
31. Chansri N., Kawakami S., Yamashita F., Hashida M. Inhibition of liver metastasis by all-trans retinoic acid incorporated into O/W emulsions in mice. *Int. J. Pharm.*, 2006, vol. 321, pp. 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.05.008>
32. Huang X., Ma Y., Li Y., Han F., Lin W. Targeted Drug Delivery Systems for Kidney Diseases. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2021, vol. 9, art. 683247. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.683247>
33. Minamiguchi K., Tanaka T., Nishiofuku H., Fukuoka Y., Taiji R., Matsumoto T., Saito N., Taguchi H., Marugami N., Hirai T., Kichikawa K. Comparison of embolic effect between water-in-oil emulsion and microspheres in transarterial embolization for rat hepatocellular carcinoma model. *Hepatol. Res.*, 2020, vol. 50, pp. 1297–1305. <https://doi.org/10.1111/hepr.13561>
34. Tao S., Lin B., Zhou H., Sha S., Hao X., Wang X., Chen J., Zhang Y., Pan J., Xu J., Zeng J., Wang Y., He X., Huang J., Zhao W., Fan J.-B. Janus particle-engineered structural lipiodol droplets for arterial embolization. *Nat. Commun.*, 2023, vol. 14, art. 5575. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41322-6>

Поступила в редакцию 12.05.2024; одобрена после рецензирования 01.07.2024; принята к публикации 02.09.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 12.05.2024; approved after reviewing 01.07.2024; accepted for publication 02.09.2024; published 31.03.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 86–92

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 86–92

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-86-92>, EDN: NGVPSU

Научная статья

УДК 535.015+57.087.1+004.418



Экспериментальные измерения концентрации глюкозы в крови прототипом оптоакустического цитометра, оценка погрешности измерений

Д. А. Кравчук

Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, д. 2

Кравчук Денис Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники, kravchukda@svedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0656-8919>, AuthorID: 550525

Аннотация. Проведены доклинические экспериментальные измерения уровня глюкозы в крови оптоакустическим методом. Экспериментальные исследования охватывали различные возрастные группы пациентов, в кровь вводили гепарин для остановки процесса свертывания. Полученные профили акустических сигналов позволили построить зависимость амплитуды акустического сигнала в пробе крови от концентрации глюкозы в крови, оценена погрешность измерений с учетом температурных и концентрационных факторов, влияющих на результат измерения уровня глюкозы.

Ключевые слова: оптоакустика, сигнал, погрешность измерений, глюкоза, лазер

Для цитирования: Кравчук Д. А. Экспериментальные измерения концентрации глюкозы в крови прототипом оптоакустического цитометра, оценка погрешности измерений // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 86–92. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-86-92>, EDN: NGVPSU

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Experimental measurements of glucose concentration in blood with a prototype of optoacoustic cytometer, assessment of measurement error

D. A. Kravchuk

Southern Federal University, 2 Schevchenko St., Taganrog 347922, Russia

Denis A. Kravchuk, kravchukda@svedu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0656-8919>, AuthorID: 550525

Abstract. Background and Objectives: Preclinical experimental measurements of blood glucose levels using the optoacoustic method were carried out. The purpose of the work is to record blood glucose levels using the optoacoustic method and obtain a graduated curve. It is necessary to establish the factors influencing the error in measuring blood glucose concentrations. Modern problems arising in the field of optoacoustic studies of blood composition are considered. **Materials and Methods:** A block diagram of the experimental setup has been developed and a prototype of the device has been created. Methods for collecting and storing blood are described. The process of experimental measurements is given. Experimental studies have been conducted on different age groups of patients with the addition of heparin to stop the clotting process. **Results:** The obtained profiles of acoustic signals have made it possible to plot the dependence of the amplitude of the acoustic signal in a blood sample on the concentration of glucose in the blood, and the measurement error has been assessed taking into account temperature and concentration factors that influence the result of measuring glucose levels. **Conclusion:** The prospects for using and comparing the obtained data for *in vivo* device development have been discussed. The diagnostic accuracy of the optoacoustic method is reduced due to biological variability and heterogeneous tissue composition.

Keywords: optoacoustic effect, acoustic signal, measurement error, glucose, laser

For citation: Kravchuk D. A. Experimental measurements of glucose concentration in blood with a prototype of optoacoustic cytometer, assessment of measurement error. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 86–92 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-86-92>, EDN: NGVPSU

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Исследования в области медицинской оптоакустики широко развиваются в нашей стране

и за рубежом [1–3]. Оценка оптоакустических изображений для прогнозирования ишемии проводилась в гемодинамике кровотока [4]. Нейрон-



ные сети с глубоким обучением используются для распознавания оптоакустических изображений тканей [3, 5, 6]. Такие методы имеют огромное преимущество при обработке больших массивов данных, в том числе для повышения качества изображений [7,8]. Проблема с восстановлением изображения является обратной акустической задачей и решается методом преобразования начального распределения давления p_0 в функцию $p(t)$. Для этого нужно провести восстановление образа сигнала $S = A^{-1}(p(t)) \approx p_0 = \mu_a \cdot \phi \cdot \Gamma$ (μ_a – коэффициент поглощения, ϕ – флюенс оптического излучения, Γ – параметр Грюнрайза). Сигнал S является аппроксимацией распределения давления p_0 [1].

Цель работы – регистрация уровней глюкозы в крови оптоакустическим методом и получение градуированной кривой, а также установление факторов, влияющих на погрешность измерения для имеющегося лазера с длиной волны 1064 нм. Хотя эксперименты проводились *in vitro*, полученные результаты экспериментальных исследований позволят приблизиться к разработке не инвазивной системы экспресс-диагностики крови. Использование метода *in vitro* позволяет избежать влияния таких факторов, как кожные эффекты поглощения и рассеяния лазерного излучения, артефакты от движения пациента или пульсации крови и т. д.

Авторы [8, 9] осуществляли контроль стадий серповидноклеточной анемии для корректировки эффективности лечения методами оптоакустической проточной цитометрии *in vivo* с применением оптоакустической (ОА) визуализации. Результаты исследований являются перспективными для обнаружения превышения уровня глюкозы на ранних стадиях клинических испытаний.

Клиническое применение проточной оптоакустической цитометрии для обнаружения циркуляции опухолевых клеток в глубоких кровеносных сосудах затруднено из-за рассеяния лазерного луча, что приводит к потере чувствительности и разрешения. Авторами [10] проведено исследование по определению размытия лазерного пятна и улучшению контрастности оптоакустического изображения вен на руках человека.

Изучение состава форменных элементов в крови человека с помощью оптоакустического метода является довольно перспективным, поскольку не приводит к изменению морфологии

состава крови. Для повышения амплитуды акустического сигнала используют наночастицы, которые имеют большой коэффициент поглощения оптического излучения и малые размеры, не приводящие к изменению свойств исследуемой жидкости [11]. Акустический сигнал формируется за счет релаксации молекул, нагретых коротким оптическим импульсом [2, 12, 13]. Исследования оптоакустического сигнала в биологических средах (как *in vivo*, так и *in vitro*) проводились рядом ведущих ученых нашей страны [2, 14].

В исследованиях оптоакустической ячейки, проводимых в работе [15], с использованием лазерного излучения с длиной волны 1535 нм предложен метод калибровки сигнала, генерируемого раствором глюкозы низкой концентрации [15].

Авторы в [16] использовали излучения в ближней ИК области 1300–2300 нм и установили, что лучшим прогностическим эффектом была оптимальная длина волны 1510 нм. При этом характеристические длины волн для глюкозы были определены с помощью разностного спектрального алгоритма и спектрального алгоритма первой производной. Известно, что максимальное поглощение глюкозы соответствует 1080 см^{-1} , минимум поглощения – 1066 см^{-1} [17]. В работе [18] авторы использовали длину волны лазерного излучения 1064 нм для определения уровня глюкозы в растворах желатина, авторы [19] проводили моделирование оптоакустического эффекта в слоистых структурах.

Полиномиальная гребневая регрессия на основе ядра для точного определения случайного уровня глюкозы в крови оптоакустическим методом рассмотрена в [20]. Изучались вопросы не инвазивного определения уровня глюкозы, с использованием источника импульсного лазерного излучения с длиной волны 905 нм по полученной коллекции из 105 отдельных случайных образцов. Сложность заключалась в сканировании пальца для целенаправленного воздействия на поры кожи.

В работе [3] исследовалось влияние ногтевого ложа, которое вносит изменения в распространение оптического излучения. Варьировались оптические просветляющие агенты с целью обеспечения лучшего проникновения света для улучшения оптической визуализации.

Лазерное излучение с энергией E , поглощаемое в биологической ткани, превращается



в тепло, вызывая локальное повышение температуры. Термодинамический процесс повышения температуры описывается формулой [1]

$$\Delta T = \frac{E}{C_p \rho V},$$

где C_p – теплоемкость, ρ – плотность среды объемом V . При короткой длительности лазерного излучения процесс термодиффузии не успевает проявиться и происходит тепловое расширение с локальным повышением давления только в облучаемом объеме:

$$\Delta P = \rho v^2 \beta \Delta T = \left(\frac{\beta v^2}{C_p} \right) \left(\frac{E}{V} \right) = \Gamma H \mu_a, \quad (*)$$

где β – коэффициент теплового расширения, v – скорость звука в области оптического поглощения, Γ – параметр Грюнайзена, H – флюенс, μ_a – коэффициент тканевого поглощения. Давление P , сформированное оптическим излучением, распространяется за пределы облучаемого объема в виде акустической волны.

Условия ограниченного напряжения выполняются, когда напряжение ограничено объемом термического упругого расширения и не успевает пройти процесс релаксации во время облучения. Время релаксации напряжения τ_a определяется временем, за которое звук распространяется в толще облучаемой области [1]:

$$\tau_a = \frac{\delta}{v},$$

где δ – ширина облучаемой области, определяемая соотношением $\delta = 1/\mu_a$ в средах с большим поглощением и $\delta = 1/\mu_{eff}$ в средах с преобладанием рассеяния. В средах с рассеянием условие формирования упругих напряжений выполняется, когда $\tau_a \gg \tau_L$ и $\tau_a \gg \tau_{dif}$ (τ_L – длительность лазерного импульса, τ_{dif} – время диффузии тепла) или $\mu_{eff} v \tau_L \ll 1$.

Из уравнения (*) для давления ΔP видно, что оптоакустический сигнал пропорционален коэффициенту поглощения облучаемой ткани. Это его наиболее важное свойство, лежащее в основе наиболее часто используемого принципа распознавания изменений в биологических тканях. Если длительность лазерного импульса имеет большую длительность $\mu_{eff} v \tau_L \geq 1$, то при возврате жидкости в равновесное состояние (релаксация) амплитуда давления акустической волны уменьшается и расширяется длительность оптоакустического сигнала [12]. Для наиболее

эффективной генерации ОА сигналов, обычно используют лазерные импульсы в наносекундном диапазоне, поэтому важными параметрами приемника являются чувствительность, время отклика, полоса пропускания, импеданс, соотношение сигнал/шум.

Материал и методы

Для регистрации акустических сигналов разработан прототип системы измерения гематокрита и кислородонасыщения [18] (рис. 1). Источник лазерного излучения имел длину волны 1064 нм, длительность 90 нс, частоту следования импульсов 10 кГц, плотность потока мощности 450 мВт/см².

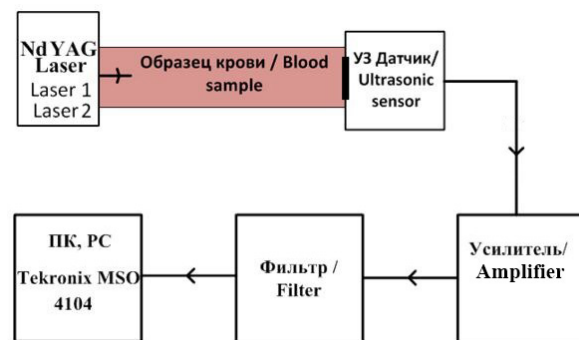


Рис. 1. Схема измерений (цвет онлайн)

Fig. 1. Measurement scheme (color online)

Пример регистрируемого сигнала приведен на рис. 2.

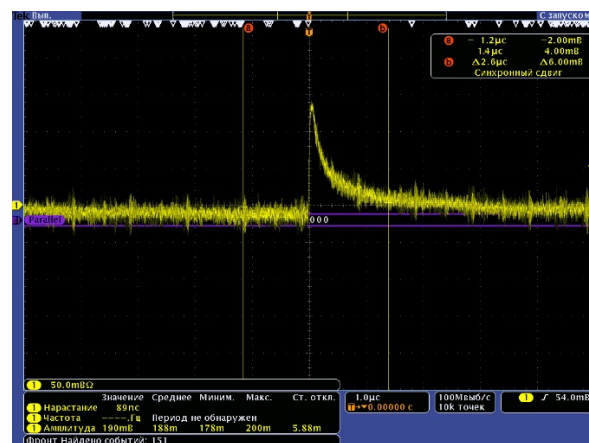


Рис. 2. Фотография осциллограммы одиночного акустического импульса в пробирке с кровью

Fig. 2. Photograph of an oscillogram of a single acoustic pulse in a test tube with blood

Акустические сигналы, сформированные при оптоакустическом эффекте, записывались длительностью 10 с. На рис. 3 приведены оптоакустические сигналы в цитометре от пробирок



с кровью для определения уровней гематокрита и кислородонасыщения.

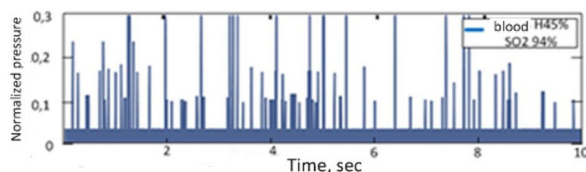


Рис. 3. Сигнал в пробирке с кровью, гематокрит 45%, сатурация 94% (цвет онлайн)

Fig. 3. Signal in a test tube with blood, hematocrit 45%, saturation 94% (color online)

Результаты

Ультразвуковые сигналы записывались измерительным комплексом Tektronix MSO 4104 (США) (см. рис. 1), фильтрация экспериментальных данных проводилась в Matlab R2017 (США).

Для остановки свертывания крови при заборе использовалась стандартная пробирка (КЗЭДТА) с использованием гепарина (~0.08 мл/20 мл крови). Зависимости амплитуды ОА сигнала от концентрации гепарина в эксперименте нами не оценивались. В кювете перед каждым измерением увеличивали концентрацию глюкозы до уровня ~14 ммоль/л. Для каждой концентрации состава крови при приращении глюкозы проводились заборы проб крови для лабораторного анализа в диагностическом центре.

Забор крови у пациентов проводили в клинических условиях. В эксперименте участвовали мужчины 40–80 лет и женщины 40–70 лет (всего порядка 30 чел.) с соблюдением всех норм

получения согласия на проведение исследований. Такие же образцы крови для верификации результатов были исследованы в клинических условиях в лаборатории медицинского центра г. Ростова на анализаторе Sysmex nx9000 (Sysmex Corporation, Япония).

В экспериментальных измерениях в качестве приемных устройств использовались специально сконструированные цилиндрические и пленочные пьезоэлектрические преобразователи с резонансными частотами (цилиндр ЦТС-19 с резонансной частотой 1.4 МГц и пьезопленочный преобразователь с резонансной частотой 1.4 и 5 МГц соответственно).

Повышение концентрации глюкозы привело к росту давления акустического сигнала и составило до 0.6 и 0.46 мПа для 6.5 и 12 ммоль/л глюкозы соответственно [21] (рис. 4), максимальное значение акустического давления – 0.36 мПа. Рост измеренного давления обусловлен снижением вязкости крови и увеличением скорости звука в пробирке с кровью, насыщенной глюкозой.

Проведём анализ полученной градуировочной кривой (рис. 5), построенной по усредненным результатам 20 измерений. Лазерное излучение будет оказывать определенное нагревающее воздействие на поверхность исследуемой жидкости, а температура образца не обязательно будет оставаться постоянной, поэтому температура раствора является одной из переменных, которую трудно контролировать. Расчеты по вкладу изменений температуры в образцах, проводимые ранее, показали рост температуры в жидкости

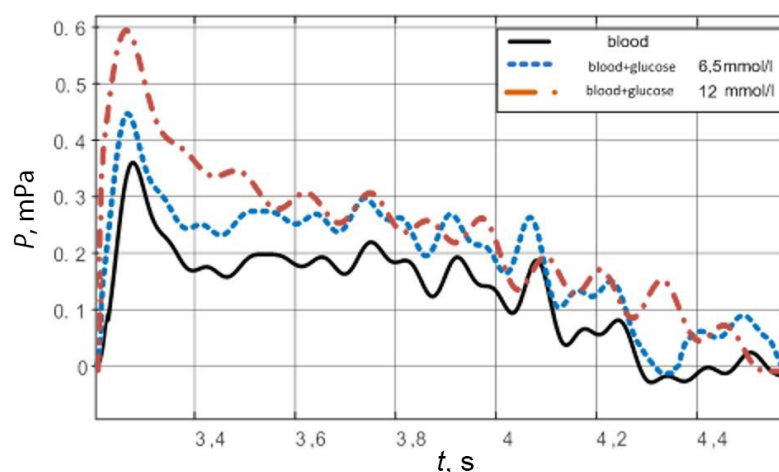


Рис. 4. Оптоакустический сигнал в крови (сплошная линия), с добавлением 6.5 и 12 ммоль/л глюкозы с гепарином (пунктирная линия) (цвет онлайн)

Fig. 4. Optoacoustic signal in blood (solid line), with the addition of 6.5 and 12 mmol/L glucose with heparin (dashed line) (color online)

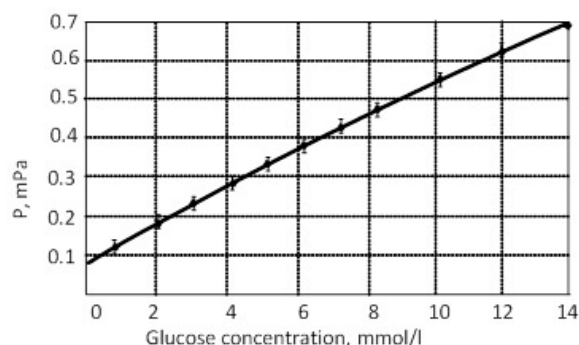


Рис. 5. Калибровочная кривая – зависимость максимальной амплитуды давления акустического сигнала в свиной крови при разных концентрациях глюкозы

Fig. 5. Calibration curve – dependence of the maximum pressure amplitude of the acoustic signal in pig blood at different glucose concentrations

на 0.3°C при воздействии лазерного излучения в течение 1 мин, наши измерения проводились в течение 10 с и за счет короткоимпульсного излучения не приводили к нагреву образца крови.

Известно, что больший вклад в формирование ОА сигнала дает концентрация кислорода в крови, нами использовалась дезоксигенированная кровь, поскольку забор крови проводился в пробирки с антикоагулянтом (КЗЭДТА лития гепарин). Не ставилась задача сохранить уровень оксигенации в специальных пробирках для гематологических исследований. Различить вклад наличия оксигенации и глюкозы можно по уровням частотного спектра акустического сигнала, расчеты которых приведены в [21, 22].

Проведены расчеты систематической ошибки ($\langle\Delta\rangle$) и стандартного отклонения (SD) оптоакустических измерений. Разница Δ между оптоакустическим исследованием и фактически установленным содержанием глюкозы в лабораторных условиях $\langle\Delta\rangle = 7\%$, $SD = 4\%$ полученные результаты демонстрируют, что точность оптоакустического измерения крови приближается к точности измерений инвазивными, стандартными методами для определения гематокрита в крови.

Заключение

Представлены исследования по определению концентрации глюкозы в крови оптоакустическим методом (длина волны 1068 нм). Построена калибровочная кривая, которая имеет линейную зависимость акустического давления оптоакустического сигнала от физиологической концентрацией глюкозы. Разработан лабораторный прототип измерителя концентрации глюкозы

в крови [23, 24]. Доказана возможность регистрации содержания глюкозы в крови оптоакустическим методом. По результатам экспериментов построена градуировочная кривая. Оценена погрешность измерения при росте температуры крови на 0.5°C , которая эквивалентна влиянию изменения концентрации на 8.5 мг/дл, что говорит о необходимости контроля температуры исследуемой жидкости. Следует провести ряд измерений по выявлению зависимости акустического сигнала от концентрации противосвертывающих препаратов в крови. Также необходимо провести сравнение измерений *in vitro* в кювете с измерениями *in vivo*, с помощью опытного образца, над созданием которого сейчас ведется работа с учетом влияния эпидермиса и пульсации крови в вене.

Список литературы

1. Oraevsky A. A., Karabutov A. A. Optoacoustic tomography // Biomedical photonics : Handbook / Vo-Dinh T., ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 2003. Chapter 34. P. 1–34. <https://doi.org/10.1201/9780203008997>
2. Езерева С. В., Симановский Я. О. Оптоакустика неоднородных биомедицинских сред: конкуренция механизмов и перспективы применения (обзор) // Акуст. журн. 2022. Т. 68, № 1. С. 96–116. <https://doi.org/10.31857/S0320791922010026>
3. Moldon P. A., Ermolinskiy P. B., Lugovtsov A. E., Timoshina P. A., Lazareva E. N., Surkov Yu. I., Gurfinkel Y. I., Tuchin V. V., Priezzhev A. V. Influence of optical clearing agents on the scattering properties of human nail bed and blood microrheological properties: In vivo and in vitro study // J. Biophotonics. 2024. Art. e202300524. <https://doi.org/10.1002/JBIO.202300524>
4. Bi R., Dinis U. S., Goh Ch. Ch., Imai T., Moothanchery M., Li X., Kim J. Y., Jeon S., Pu Y., Kim Ch., Ng L. G., Wang L. V., Olivo M. In vivo label-free functional photoacoustic monitoring of ischemic reperfusion // J. Biophotonics. 2019. Vol. 12, № 7. Art. e201800454. <https://doi.org/10.1002/jbio.201800454>
5. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. P. 580–587. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81>
6. Кравчук Д. А. Восстановление акустического сигнала при оптоакустическом взаимодействии для визуализации биологических тканей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия : Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1. С. 67–75.
7. Wang G. A perspective on deep imaging // IEEE Access, 2016. Vol. 4. P. 8914–8924. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2624938>
8. Assi H., Cao R., Castelino M., Cox B., Gilbert F. J., Gröhl J., Gurusamy K., Hacker L., Ivory A. M., Joseph J.,



- Knieling F., Leahy M. J., Lilaj L., Manohar S., Meglinski I., Moran C., Murray A., Oraevsky A. A., Pagel M. D., Pramanik M., Raymond J., Mithun K. A. S., Vögt W. C., Wang L., Yang S., Bohndiek S. E. A review of a strategic roadmapping exercise to advance clinical translation of photoacoustic imaging: From current barriers to future adoption // *Photoacoustics*. 2023. Vol. 32. Art. 100539. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2023.100539>
9. Cai C., Nedosekin D. A., Menyayev Y. A., Sarimollaoglu M., Proskurnin M. A., Zharov V. P. Photoacoustic flow cytometry for single sickle cell detection *in vitro* and *in vivo* // *Analytical Cellular Pathology*. 2016. Vol. 2016, iss. 1. Art. 2642361. <https://doi.org/10.1155/2016/2642361>
10. Menyayev Y. A., Nedosekin D. A., Sarimollaoglu M., Juratli M. A., Galanzha E. I., Tuchin V. V., Zharov V. P. Optical clearing in photoacoustic flow cytometry // *Biomed. Opt. Express*. 2013. Vol. 4, № 12. P. 3030–3041. <https://doi.org/10.1364/BOE.4.003030>
11. Pearl W. G., Selvam R., Karmenyan A. V., Perevedentseva E. V., Hung S., Chang H. H., Shushunova N. A., Prikozhdenko E. S., Bratashov D. N., Tuchin V. V., Cheng C. L. Berberine mediated fluorescent gold nanoclusters in biomimetic erythrocyte ghosts as a nanocarrier for enhanced photodynamic treatment // *RSC Adv*. 2024. Vol. 14, № 5. P. 3321–3334. <https://doi.org/10.1039/d3ra08299g>
12. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
13. Дунина Т. А., Егереv, С. В., Ляmшев, Л. М., Наугольных К. А. К нелинейной теории теплового механизма генерации звука лазерным излучением // *Акуст. журн*. 1979. Т. 25. С. 622–625.
14. Savateeva E. V., Karabutov A. A., Solomatin S. V. Optical properties of blood at various levels of oxygenation studied by time-resolved detection of laser-induced pressure profiles // *Proc. SPIE. Biomedical Optoacoustics III*. 2002. Vol. 4618. P. 63–75. <https://doi.org/10.1117/12.469849>
15. Yang L., Chen C., Zhang Z., Wei X. Glucose Determination by a Single 1535 nm Pulsed Photoacoustic Technique: A Multiple Calibration for the External Factors // *J. Healthc. Eng*. 2022. Vol. 2022. Art. 9593843. <https://doi.org/10.1155/2022/9593843>
16. Ren Z., Liu G., Huang Z., Zhao D., Xiong Z. Exploration and Practice in Photoacoustic Measurement for Glucose Concentration Based on Tunable Pulsed Laser Induced Ultrasound // *Int. J. Optomechatronics*. 2015. Vol. 9, № 3. P. 221–237. <https://doi.org/10.1080/15599612.2015.1051677>
17. Yadav J. R., Asha S., Vijander M., Bhaskar M. Prospects and limitations of non-invasive blood glucose monitoring using near-infrared spectroscopy // *Biomed. Signal Process. Control*. 2015. Vol. 18, № 1. P. 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.01.005>
18. Quan K. M., Christison G. B., MacKenzie H. A., Hodgson P. Glucose determination by a pulsed photoacoustic technique: An experimental study using a gelatin-based tissue phantom // *Phys. Med. Biol*. 1993. Vol. 38, № 12. P. 1911–1922. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/38/12/014>
19. Jin H., Zheng Z., Liu S., Zhang R., Liao X., Liu S., Zheng Y. Pre-migration: A General Extension for Photoacoustic Imaging Reconstruction // *IEEE Trans. Comput. Imaging*. 2020. Vol. 6. P. 1097–1105. <https://doi.org/10.1109/TCI.2020.3005479>
20. Prasad V. P. N. S. B. S., Syed A. H., Himansh M., Jana B., Mandal P., Sanki P. K. Augmenting authenticity for non-invasive *in vivo* detection of random blood glucose with photoacoustic spectroscopy using Kernel-based ridge regression // *Sci. Rep. Nature Research*. 2024. Vol. 14, № 1. Art. 8352. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53691-z>
21. Кравчук Д. А. Результаты экспериментальных исследований оптоакустического отклика в биологических тканях и их моделях // *Прикладная физика*. 2022. Т. 3, № 3. С. 63–66. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-3-63-66>
22. Kravchuk D. A., Voronina K. A. Studies of red blood cell aggregation and blood oxygenation on the basis of the optoacoustic effect in biological media // *J. Biomed. Photonics Eng*. 2020. Vol. 6, № 1. P. 010307-1–010307-5. <https://dx.doi.org/10.18287/JBPE20.06.010307>
23. Кравчук Д. А. Использование оптоакустического эффекта для измерения концентрации глюкозы // *Прикладная физика*. 2021. Т. 6, № 3. С. 63–66. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-6-63-66>
24. Kravchuk D. A., Starchenko I. B. Reconstruction of the Optical Acoustic Signal for Visualization of Biological Tissues // *Physics and Mechanics of New Materials and Their Application. Processing of the International Conference PHENMA*. 2021 / eds. I. A. Parinov, S. H. Chang. Springer Proceedings in Materials. Cham, Springer, 2021. Vol. 10. P. 473–479. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76481-4_39

References

1. Oraevsky A. A., Karabutov A. A. Optoacoustic tomography. In: Vo-Dinh T., ed. *Biomedical photonics: Handbook*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2003. 1872 p. Chapter 34, pp. 1–34. <https://doi.org/10.1201/9780203008997>
2. Egerev S. V., Simanovsky Ya. O. Optoacoustics of inhomogeneous biomedical media: Competition of mechanisms and application prospects (review). *Acoustical Physics*, 2022, vol. 68, no. 1, pp. 96–116 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0320791922010026>
3. Moldon P. A., Moldon P. A., Ermolinskiy P. B., Lugovtsov A. E., Timoshina P. A., Lazareva E. N., Surkov Yu I., Gurfinkel Y. I., Tuchin V. V., Priezzhev A. V. Influence of optical clearing agents on the scattering properties of human nail bed and blood microrheological properties: *In vivo* and *in vitro* study. *J. Biophotonics*, 2024, art. e202300524. <https://doi.org/10.1002/JBIO.202300524>
4. Bi R., Dinis U. S., Goh Ch. Ch., Imai T., Moothanchery M., Li X., Kim J. Y., Jeon S., Pu Y., Kim Ch., Ng L. G., Wang L. V., Olivo M. *In vivo* label-free functional photoacoustic monitoring of ischemic reperfusion. *J. Biophotonics*, 2019, vol. 12, no. 7, art. e201800454. <https://doi.org/10.1002/jbio.201800454>
5. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *Proceedings of the IEEE Computer*



- Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 580–587. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81>
6. Kravchuk D. A. Restoration of acoustic signal during optoacoustic interaction for visualization of biological tissue. *Proceedings of the Southwest State University Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 67–75 (in Russian).
 7. Wang G. A perspective on deep imaging. *IEEE Access.*, 2016, vol. 4, pp. 8914–8924. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2624938>
 8. Assi H., Cao R., Castelino M., Cox B., Gilbert F. J., Gröhl J., Gurusamy K., Hacker L., Ivory A. M., Joseph J., Knieling F., Leahy M. J., Lilaj L., Manohar S., Meglinski I., Moran C., Murray A., Oraevsky A. A., Pagel M. D., Pramanik M., Raymond J., Mithun K. A. S., Vogt W. C., Wang L., Yang S., Members of IPASC, Bohndiek S. E. A review of a strategic roadmapping exercise to advance clinical translation of photoacoustic imaging: From current barriers to future adoption. *Photoacoustics*, 2023, vol. 32, art. 100539. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2023.100539>
 9. Cai C., Nedosekin D. A., Menyaev Y. A., Sarimollaoglu M., Proskurnin M. A., Zharov V. P. Photoacoustic flow cytometry for single sickle cell detection *in vitro* and *in vivo*. *Analytical Cellular Pathology*, 2016, vol. 2016, iss. 1, art. 2642361. <https://doi.org/10.1155/2016/2642361>
 10. Menyaev Y. A., Nedosekin D. A., Sarimollaoglu M., Juratli M. A., Galanzha E. I., Tuchin V. V., Zharov V. P. Optical clearing in photoacoustic flow cytometry. *Biomed. Opt. Express.*, 2013, vol. 4, no. 1, pp. 3030–3041. <https://doi.org/10.1364/BOE.4.003030>
 11. Pearl W. G., Selvam R., Karmenyan A. V., Perevedentseva E. V., Hung S., Chang H. H., Shushunova N. A., Prikhodzhenko E. S., Bratashov D. N., Tuchin V. V., Cheng C. L. Berberine mediated fluorescent gold nanoclusters in biomimetic erythrocyte ghosts as a nanocarrier for enhanced photodynamic treatment. *RSC Adv.*, 2024, vol. 14, no. 5, pp. 3321–3334. <https://doi.org/10.1039/d3ra08299g>
 12. Gusev V. E., Karabutov A. A. *Lazernaya optoakustika* [Laser optoacoustics]. Moscow, Nauka, 1991. 304 p. (in Russian).
 13. Dunina T. A., Egerev S. V., Lyamshev L. M., Naugolnykh K. A. On the nonlinear theory of the thermal mechanism of sound generation by laser radiation. *Acoustical Physics*, 1979, vol. 25, pp. 622–625 (in Russian).
 14. Savateeva E. V., Karabutov A. A., Solomatin S. V. Optical properties of blood at various levels of oxygenation studied by time-resolved detection of laser-induced pressure profiles. *Proc. SPIE. Biomedical Optoacoustics III*, 2002, vol. 4618, pp. 63–75. <https://doi.org/10.1117/12.469849>
 15. Yang L., Chen C., Zhang Z., Wei X. Glucose Determination by a Single 1535 nm Pulsed Photoacoustic Technique: A Multiple Calibration for the External Factors. *J. Healthc. Eng.*, 2022, vol. 1, art. 9593843. <https://doi.org/10.1155/2022/9593843>
 16. Ren Z., Liu G., Huang Z., Zhao D., Xiong Z. Exploration and Practice in Photoacoustic Measurement for Glucose Concentration Based on Tunable Pulsed Laser Induced Ultrasound. *Int. J. Optomechatronics*, 2015, vol. 9, no. 3, pp. 221–237. <https://doi.org/10.1080/15599612.2015.1051677>
 17. Yadav J. R., Asha S., Vijander M., Bhaskar M. Prospects and limitations of non-invasive blood glucose monitoring using near-infrared spectroscopy. *Biomed. Signal Process. Control.*, 2015, vol. 18, pp. 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.01.005>
 18. Quan K. M., Christison G. B., MacKenzie H. A., Hodgson P. Glucose determination by a pulsed photoacoustic technique: An experimental study using a gelatin-based tissue phantom. *Phys. Med. Biol.*, 1993, vol. 38, no. 1, pp. 1911–1922. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/38/12/014>
 19. Jin H., Zheng Z., Liu S., Zhang R., Liao X., Liu S., Zheng Y. Pre-migration: A General Extension for Photoacoustic Imaging Reconstruction. *IEEE Trans. Comput. Imaging*, 2020, vol. 6, pp. 1097–1105. <https://doi.org/10.1109/TCI.2020.3005479>
 20. Prasad V. P. N. S. B. S., Syed A. H., Himansh M., Jana B., Mandal P., Sanki P. K. Augmenting authenticity for non-invasive *in vivo* detection of random blood glucose with photoacoustic spectroscopy using Kernel-based ridge regression. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, art. 8352. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53691-z>
 21. Kravchuk D. A. Results of experimental studies of optoacoustic response in biological tissues and their models. *Applied Physics*, 2022, vol. 3, no. 3, pp. 63–66 (in Russian). <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-3-63-66>
 22. Kravchuk D. A., Voronina K. A. Studies of Red Blood Cell Aggregation and Blood Oxygenation on the Basis of the Optoacoustic Effect in Biological Media. *J. Biomed. Photonics Eng.*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 010307-1–010307-5. <https://dx.doi.org/10.18287/JBPE20.06.010307>
 23. Kravchuk D. A. Application of the optoacoustic effect to measure glucose concentration. *Applied Physics*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 63–66 (in Russian). <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-6-63-66>
 24. Kravchuk D. A., Starchenko I. B. Reconstruction of the Optical Acoustic Signal for Visualization of Biological Tissues. In: Parinov I. A., Chang S. H., eds. *Physics and Mechanics of New Materials and Their Application. Processing of the International Conference PHENMA. 2021*. Springer Proceedings in Materials. Cham, Springer, 2021, vol. 10, pp. 473–479. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76481-4_39

Поступила в редакцию 23.04.2024; одобрена после рецензирования 30.05.2024;
принята к публикации 02.09.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 23.04.2024; approved after reviewing 30.05.2024;
accepted for publication 02.09.2024; published 31.03.2025

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМАТЕРИАЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 93–105
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 93–105
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-93-105>, EDN: QNRMSZ

Научная статья
УДК 620.3:29.19.31

Перспективы создания и использования гетерофазного материала CdS-FeS, полученного с применением метода Ленгмюра–Блоджетт

С. В. Стецюра[✉], П. Г. Харитоновна, А. В. Козловский

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Стецюра Светлана Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, stetsyurasv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4337-012X>, AuthorID: 443504

Харитоновна Полина Геннадьевна, старший преподаватель кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, haritonovapg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0591-9908>, AuthorID: 877137

Козловский Александр Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, kozlowsky@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3612-9776>, AuthorID: 790112

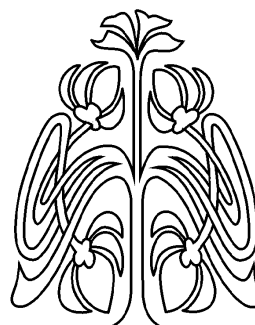
Аннотация. Представлены результаты исследований по получению полумагнитного полупроводника с помощью технологии Ленгмюра–Блоджетт на основе полупроводниковой пластины CdS. В результате проведенных исследований материала в процессе получения с помощью анализа изотерм сжатия, а также методами атомно-силовой микроскопии, вторично-ионной масс-спектрометрии и энергодисперсионного анализа можно утверждать, что метод получения материала CdS:Fe, обладающего свойствами полумагнитного полупроводника, при использовании метода Ленгмюра–Блоджетт полностью воспроизводим, позволяет создавать гетерофазный материал с нановключениями фазы FeS. Показано, что полученный материал обладает уникальными свойствами, такими как повышенная фоточувствительность и отрицательная фотоотомляемость, что весьма перспективно при создании устройств, работающих в условиях постоянного интенсивного освещения и чьи характеристики могут настраиваться и регулироваться освещением.

Ключевые слова: сульфиды кадмия и железа, полумагнитный полупроводниковый материал, метод Ленгмюра–Блоджетт, атомно-силовая микроскопия, фотоэлектрические характеристики, отрицательная фотоотомляемость

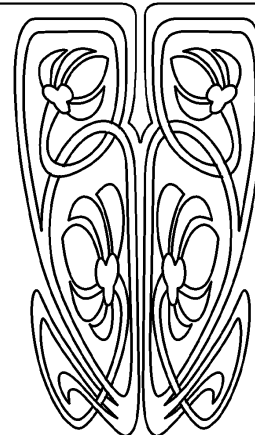
Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00194, <https://rscf.ru/project/22-22-00194/>).

Для цитирования: Стецюра С. В., Харитоновна П. Г., Козловский А. В. Перспективы создания и использования гетерофазного материала CdS-FeS, полученного с применением метода Ленгмюра–Блоджетт // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 93–105. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-93-105>, EDN: QNRMSZ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





Article

Perspectives for the creation and application of heterophase material CdS-FeS obtained by the Langmuir–Blodgett method

S. V. Stetsyura[✉], P. G. Kharitonova, A. V. Kozlowski

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Svetlana V. Stetsyura, Stetsyurasv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4337-012X>, AuthorID: 443504

Polina G. Kharitonova, haritonovapg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0591-9908>, AuthorID: 877137

Alexander V. Kozlowski, kozlowsky@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3612-9776>, AuthorID: 790112

Abstract. Background and Objectives: Cadmium sulfide (CdS) is one of the most promising materials for photovoltaic devices, but it is increasingly used as part of complex heterostructures and heterophase materials that provide expanded functionality and perspective for use. This article presents the results of studies on the production of semi-magnetic semiconductor material CdS-FeS, conventionally designated CdS:Fe, using the Langmuir–Blodgett technology. The morphology of the surface layers and the photoelectric characteristics of the obtained material are considered in detail in comparison with the original sample. **Methods:** A nanosized coating of iron arachinate (ArchFe) was prepared on the surface of CdS using the Langmuir–Blodgett method. The parameters of ArchFe monolayers were controlled using compression isotherms. The CdS/ArchFe structure was annealed in air. Energy-dispersive analysis and mass spectrometric studies were carried out to control the current processes before and after annealing. The main methods for studying hybrid structures of CdS/ArchFe and heterophase material CdS:Fe were atomic force microscopy and analysis of photoelectric characteristics using steady-state and kinetic approaches. **Results:** The resulting material is a matrix of $\text{Cd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ solid solution with nanoinclusions of the FeS phase. Analysis of atomic force microscopy images has confirmed the high reproducibility of the proposed method. We have shown the occurrence of the effect of “negative photofatigue” and an increase in integral photosensitivity by 70 times for a heterophase sample compared to “pure” CdS. **Conclusion:** It has been shown that the resulting material has unique properties, such as increased photosensitivity and negative photofatigue, which is very perspective for creating devices that can operate in conditions high illumination and whose characteristics can be controlled by illumination.

Keywords: cadmium and iron sulfides, semi-magnetic semiconductor material, Langmuir–Blodgett method, atomic force microscopy, photoelectric characteristics, negative photofatigue

Acknowledgments: This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-22-00194, <https://rscf.ru/en/project/22-22-00194/>).

For citation: Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Kozlowski A. V. Perspectives for the creation and application of heterophase material CdS-FeS obtained by the Langmuir–Blodgett method. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 93–105 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-93-105>, EDN: QNRMSZ

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В ряду фоточувствительных полупроводников типа A2B6 сульфид кадмия (CdS) сам по себе остается одним из наиболее перспективных и востребованных материалов для приборов фотовольтаики [1], но все чаще его применяют в составе сложных гетероструктур, гетерофазных материалов [2–4] или твердых растворов [5], дающих расширенные функциональные возможности и перспективы использования. Причем исследователями широко изучаются как классические планарные структуры на основе материалов A2B6, так и более сложные наноструктурированные системы, например, такие как островковые покрытия [6, 7], покрытия на основе наночастиц, квантовых точек [3, 8] и нанострежней [9]. Если достоинством классического планарного подхода является технологическая простота получения и наличие отработанных методов получения, то при использовании второго подхода зачастую отмечают лучший КПД использования светового потока и большая фото- и энергоэффективность [10]. При использовании CdS в качестве

основы для материалов фотодатчиков различного типа, а также в качестве основы для формирования солнечных батарей ряд исследователей [10] сумели получить значительное усиление фоточувствительности и энергоэффективности путем модификации поверхности CdS органическим слоем, в частности, нитроцеллюлозой [11]. Этот эффект объяснили уменьшением влияния поверхностных вакансий серы за счет их пассивации. Ранее [1] было показано увеличение фоточувствительности и радиационной стойкости CdS, модифицированных свинецсодержащими кластерами, полученными, в том числе с помощью органических покрытий. Влияние свинецсодержащих кластеров на фотоэлектрические характеристики CdS рассмотрели также авторы [12], отметив повышение эффективности солнечных батарей, созданных на основе такого гетерофазного материала.

Также было показано [13], что CdS имеет хорошие перспективы применения при добавлении магнитных атомов, например Fe, поскольку при определенных соотношениях компонентов



и технологии свойства получаемого гетерофазного материала соответствуют свойствам полупроводникового полупроводника (ПМП). ПМП – это относительно новый класс материалов, сочетающих в себе свойства обычных и магнитных полупроводников [14]. Это позволяет рассматривать материал CdS, легированный Fe (CdS:Fe), как перспективный материал для создания гетерофазных управляемых структур [15], так как под воздействием и магнитного поля, и освещения в нём могут происходить обратимые изменения магнитных и фотоэлектрических свойств.

В работе [13] для создания ПМП CdS:Fe был использован метод термического испарения в вакууме, при котором на подложку последовательно наносились слои Fe и CdS, после чего образец отжигался на воздухе, и атомы Fe диффундировали в CdS с образованием твёрдого раствора замещения $Cd_xFe_{1-x}S$. Однако из-за низкой взаимной растворимости компонентов параллельно происходило образование преципитатов из атомов Fe, солей FeS и оксидов Fe_2O_3 . Для доказательства образования наноразмерных ферромагнитных фаз были исследованы опеспектры и профили вторичной ионной масс-спектрометрии, показывающие распределения атомов S, Cd и Fe в образцах до и после отжига [13], измерялись кривые намагниченности полученных структур [16]. В проведённых экспериментах в [13, 16] полупроводниковая плёнка CdS:Fe показала свойства классического ПМП, соединив в себе наличие отдельных атомов Fe в твёрдом растворе $Cd_xFe_{1-x}S$, обладающим парамагнитными свойствами, и наноразмерных фаз Fe_2O_3 и FeS, которым присущи ферромагнитные свойства.

Недостатками описанной в [13] технологии получения пленок CdS:Fe являются параметры и расположение слоя Fe. Такой слой не является ограниченным источником Fe, что не позволяет рассчитать параметры нановключений и их концентрацию в CdS с необходимой точностью. Кроме того, источник диффузии в этом случае располагается между инертной подложкой и фоточувствительным слоем, что приводит к росту концентрации преципитатов железа ближе к неосвещаемой стороне пленки CdS:Fe, снижая тем самым эффект от их наличия. Для устранения этих недостатков при создании источника диффузанта Fe для создания материала CdS:Fe представляется перспективным использование метода Ленгмюра–Блоджетт. При определенных условиях данный метод позволяет достаточно тонко

регулировать количество примеси в концентрациях, которые сложно контролировать при других технологиях [17]. Технология получения монослоев арахиноата железа (в дальнейшем, условно обозначаемом ArchFe) и переноса их на твердые подложки была проработана нами в [18, 19].

Таким образом, целью данной работы является выявление морфологии и фотоэлектрических характеристик гибридных структур CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe.

1. Материалы и методы

1.1. Получение наноструктурированных железом органических слоев, их перенос на CdS и формирование гетерофазного материала CdS:Fe

В качестве фоточувствительной подложки для создания ПМП структур были взяты пластины монокристаллического CdS. Для получения покрытия, нанометровой толщины, являющегося источником Fe при диффузии, использовался метод Ленгмюра–Блоджетт, который позволяет переносить на поверхность подложки CdS атомы Fe в составе органического монослоя.

Для получения структурированных Fe монослоев арахиновая кислота разводилась в хлороформе до концентрации 0.001 моль/л и вводилась в объёме 50 мкл на поверхность водного раствора $FeCl_3$. Подбор концентрации $FeCl_3$ осуществлялся с учетом влияния pH раствора, так как многочисленными исследованиями показано, что pH раствора значительно влияет на степень ионизации молекул в нем, возможную кластеризацию атомов металла и итоговую плотность металла в созданном покрытии [20, 21].

Так, при значениях $pH \sim 7$ (для каждого вещества это значение немного варьируется) происходит ионизация, как правило, порядка 50% головных частей молекул. При сжатии монослоя за счет ионного взаимодействия происходит образование водородной связи, в результате чего структура монослоя упорядочивается, а площадь, приходящаяся на одну молекулу в плотноупакованном состоянии монослоя, уменьшается [20]. Увеличение концентрации ионов OH^- в субфазе приводит к росту вероятности разрыва O–H связи, что в процессе сжатия монослоев ведет к увеличению электростатических сил отталкивания между одноименно заряженными головными группами молекул и препятствует их сближению в монослой. В результате площадь, приходящаяся



на одну молекулу в плотноупакованном состоянии, увеличивается [20]. При уменьшении pH до значений $\text{pH} \sim 3$ происходит рост концентрации ионов H^+ , в результате чего значительно уменьшается вероятность разрыва О-Н связи, что резко снижает эффективность образования водородных связей между головными частями молекул, и площадь, приходящаяся на одну молекулу в плотноупакованном состоянии, также возрастает [20, 21] в сравнении с площадями, характерными для «средних» значений pH. Поэтому при проведении исследований требуется установить оптимальное значение pH, при котором достигается плотная, наиболее упорядоченная упаковка органического металлизированного монослоя.

Для получения пленок Ленгмюра–Блоджетт была использована установка для нанесения монослоев KSV-Nima LB Through Medium KN 2002 (KSV-Nima, Финляндия), снабженная двумя подвижными барьерами, которые обеспечивали симметричное двухстороннее сжатие монослоя со скоростью 25 мм/мин и с точностью определения площади, занимаемой монослоем, до 0.1%. Измерение поверхностного натяжения осуществлялось методом взвешивания пластины Вильгельми с точностью 0.01 мН/м. Перенос монослоя с поверхности субфазы на подложку осуществлялся в автоматическом режиме по методу Ленгмюра–Шеффера, что обусловлено соотношением геометрических размеров ванны и использованных образцов. В результате выполнения этого этапа формировались структуры CdS/ArchFe.

1.1.1. Методы контроля и исследования слоев ArchFe в процессе получения

Для контроля значения pH субфазы использовался буферный раствор на основе ацетата натрия, позволяющий фиксировать значение pH, оптимальное для однородного и достаточно плотного распределения Fe в монослое. С учетом результатов исследований [18], в которых проводилась апробация режимов получения на твердой подложке наноразмерных покрытий ArchFe, содержащих контролируемое количество атомов Fe, были выбраны следующие условия эксперимента: концентрация железосодержащей соли FeCl_3 10^{-3} моль/л и pH водной субфазы 4.2 ± 0.05 . Эти условия обеспечивают максимальное встраивание атомов Fe в монослой арахидиновой кислоты, но при этом отсутствует кластерообразование атомов Fe в монослое ArchFe, затрудняющее расчет

поверхностной концентрации атомов Fe и прогнозирование результатов диффузии Fe в CdS при последующем отжиге.

Параметры получаемых покрытий ArchFe, в частности плотность упаковки монослоя, контролировалась по изотермам сжатия, измеряемым в процессе сжатия монослоя ArchFe на поверхности водной субфазы.

В ходе процесса получения плотноупакованного монослоя контролировались температура, поверхностное давление π монослоя и средняя площадь A , приходящаяся на одну молекулу в монослое. Оптимальными технологическими параметрами являются: температура воздуха и субфазы $23 \pm 1^\circ\text{C}$ и поверхностное давление 17 мН/м. Они поддерживались в процессе получения слоя постоянными, и при них проводился перенос железосодержащих монослоев на твердую подложку. В ходе эксперимента были получены следующие изотермы сжатия: на водной субфазе без добавления натрий-ацетатного буфера и FeCl_3 , с добавлением буферного раствора, но без FeCl_3 , с добавлением буферного раствора и FeCl_3 в водную субфазу. Типичные изотермы для каждой серии экспериментов показаны на рис. 1,

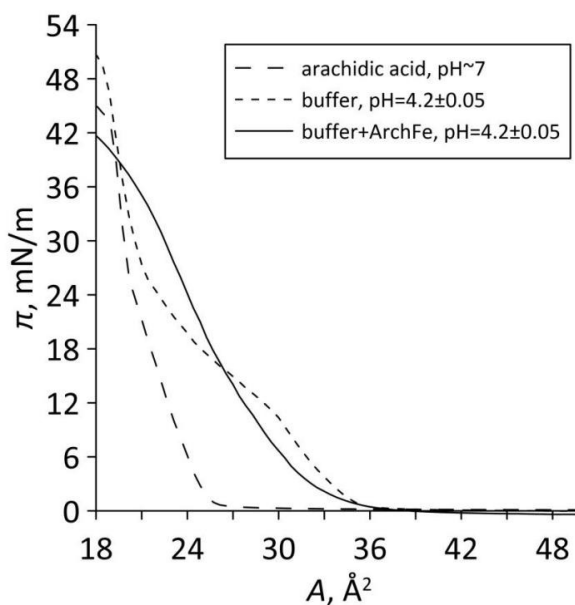


Рис. 1. Изотермы сжатия для монослоев арахидиновой кислоты: на водной субфазе при $\text{pH} \sim 7$, арахидиновой кислоты на водной субфазе при $\text{pH} = 4.2 \pm 0.05$, на субфазе водного раствора хлорида железа при $\text{pH} = 4.2 \pm 0.05$

Fig. 1. Compression isotherms for monolayers of arachidic acid on the aqueous subphase at $\text{pH} \sim 7$, arachidic acid on the aqueous subphase at $\text{pH} = 4.2 \pm 0.05$, and arachidic acid on the subphase of an aqueous solution of ferric chloride at $\text{pH} = 4.2 \pm 0.05$



из которого следует, что за счет связывания катионов Fe с органическим монослоем произошли изменения изотерм сжатия, характерные для изменения pH субфазы и встраивания ионов металла в монослой [22].

Из рис. 1 следует, что значение относительной площади, приходящейся на одну молекулу арахидоновой кислоты в плотноупакованной фазе, составляет 22.1 \AA^2 , при добавлении буфера она увеличилась до 23.7 \AA^2 , а в случае добавления и буфера, и FeCl_3 эта площадь увеличилась до 31.6 \AA^2 . Подобные изменения свидетельствуют о том, что значительная часть молекул монослоя арахидоновой кислоты прореагировала с ионами Fe с образованием ArchFe.

Для количественной оценки качества переноса монослоя ArchFe на подложку CdS был рассчитан коэффициент переноса – отношение убыли площади монослоя ($\Delta S_{\text{МС}}$) при однократном прохождении подложки сквозь монослой к площади твердой подложки ($S_{\text{подл}}$):

$$k = \frac{\Delta S_{\text{МС}}}{S_{\text{подл}}} = \frac{(S' - S'')}{S_{\text{подл}}}. \quad (1)$$

Убыль площади монослоя рассчитывалась как $\Delta S_{\text{МС}} = S' - S''$, где S' и S'' – площадь монослоя в момент начала переноса и после его окончания, соответственно. Были получены значения k в диапазоне 0.89–0.93, что свидетельствует о достоверном факте переноса на подложку монослоя удовлетворительного качества.

Количество перенесенных монослоев было доведено до 25, что обеспечило достаточную концентрацию Fe в органическом покрытии. Таким образом, были получены образцы CdS, поверхность которых модифицирована слоем ArchFe. Следующим этапом был отжиг образцов на воздухе при температуре $545 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 60 минут. В результате высокотемпературного отжига происходила диффузия атомов Fe вглубь CdS и был получен гетерофазный материал, условно обозначаемый CdS-FeS.

1.1.2. Методы контроля атомов железа на поверхности и в объеме CdS

Для определения процента Fe на поверхности структуры CdS/ArchFe до и после отжига был проведен энергодисперсионный анализ (ЭДА) образцов при помощи автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU (Tescan, Чехия), оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40. ЭДА подтвердил, что

на поверхности неотожженного образца регистрируется Fe (около 3.8% от общего количества атомов приповерхностной области), причем процентное соотношение всех регистрируемых элементов на разных участках подложки примерно одинаковое, что означает равномерное распределение атомов Fe по поверхности CdS при нанесении покрытия. После отжига процент атомов Fe на поверхности существенно уменьшился (до 1.2%), что говорит о том, что Fe частично диффундировал в объем подложки, но часть его еще находится на поверхности.

Результаты масс-спектрометрических исследований, подтверждающих диффузию и распределение Fe, S, Cd и кислорода после отжига в образцах CdS:Fe приведены нами в [23]. В [13] было показано, что Fe при введении в CdS замещает атомы Cd, результатом чего является образование твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{S}$, но ввиду малой растворимости Fe в CdS также образуются наноразмерные преципитаты FeS, что и приводит к формированию гетерофазного материала CdS-FeS, обладающего свойствами ПМП.

1.2. Методы исследования гибридных структур CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe

Основными методами исследования гибридных структур CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe, были атомно-силовая микроскопия (АСМ) и анализ фотоэлектрических характеристик с использованием стационарного и кинетического подходов.

Изображения АСМ были получены на зондовой станции «NTEGRA-Spectra» (NT-MDT, Россия). Сканирование осуществлялось в полуконтактном режиме с помощью кантилевера FMG01/Pt с платиновым напылением, разрешение составляло 512×512 точек. Обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения Gwyddion 2.62. Анализ АСМ-сканов может показать не только степень изменения морфологии поверхности после нанесения покрытия и его отжига, но и свидетельствовать об однородности нанесения, о процессах, произошедших на поверхности в результате отжига.

Для контроля изменения фотоэлектрических характеристик использовали зондовую станцию PM-5 Cascade Microtech с анализатором Agilent B1500A (Agilent Technologies, США). Для освещения использовалась галогенная лампа Motic MLK-150C с регулируемым уровнем мощности. Контактные площадки на поверхность образцов



не наносились, измерения осуществлялись с помощью вольфрамовых зондов, под которые для уменьшения вероятности повреждения поверхности подкладывались тонкие шайбочки индия фиксированного диаметра (~300 мкм). Расстояние между контактами поддерживалось постоянным ~800 мкм. Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) при освещении и в темноте. Интерпретация хода ВАХ при освещении также может существенно зависеть от «предыстории» образца, например, длительности освещения до проведения измерений, а также от способа освещения – здесь можно выделить поперечную и продольную фотопроводимость [1], освещение с постоянной интенсивностью или импульсное. Максимальное количество информации из фотоэлектрических характеристик можно получить, применяя одновременно стационарный и кинетический подходы при их изучении.

Стационарный подход в наших исследованиях заключался в измерении ВАХ в трех «фиксированных точках»: в одинаковых условиях измерялись характеристики образца CdS с немодифицированной поверхностью, гибридной структуры CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe. Все измерения проводились в поперечном режиме фотопроводимости (при котором направления светового потока и линий напряженности электрического поля практически перпендикулярны), при одинаковой освещенности 20000 лк и в диапазоне напряжений от –10 до +10 В. Стационарный подход позволяет корректно оценивать итоговые изменения, произошедшие с образцом в результате модификации поверхности или отжига.

Кинетический подход дает возможность оценить скорость изменений параметров исследуемых образцов, имеющих различную «предысторию». При этом в этом случае возможно измерение фототока при фиксации рабочих параметров (напряжения, освещенности) или импульсное изменение одного из параметров во времени.

2. Результаты измерений и их обсуждение

Данный раздел содержит результаты экспериментальных исследований гибридных структур CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структур CdS/ArchFe, проведенных с помощью АСМ и измерения фотоэлектрических характеристик. Впервые представлены результаты для отоженных структур типа CdS:Fe с использованием стационарного и кинетического подходов.

2.1. Результаты АСМ-измерений и их обсуждение

На рис. 2 представлены типичные сканы рельефа поверхности «чистого» CdS, CdS, модифицированного арахином железа (CdS/ArchFe) и гетерофазного материала, полученного при отжиге структуры CdS/ ArchFe (CdS:Fe), для которых также находили значения статистических параметров, характеризующих рельеф поверхности (таблица).

Размер сканов (50×50 мкм) одинаков во всех случаях, что позволяет проводить корректное сравнение статистических параметров, характеризующих распределения высот. Указанный размер сканов достаточно хорошо отражают морфологию поверхности образцов в целом, при этом позволяя выделять изменения, происходящие на субмикронном уровне. Под каждым сканом показано распределение высот вдоль выделенной линии на скане, а на рис. 2, г представлены распределения высот рельефа, полученные сканированием изображений АСМ, показанных на рис. 2, а–в соответственно. Распределения высот на рис. 2, г визуальны приближены к распределению Гаусса, что подтверждают значения параметра асимметрии a , приведенного в таблице статистических параметров. Параметр a описывает форму функции распределения вероятности: он положителен, если правый «хвост» распределения длиннее левого, и отрицателен в противном случае. Значения a для всех АСМ-изображений близки к нулю, что в целом указывает на симметричность распределений, и, следовательно, на достаточно хорошую равномерность распределения высот неровностей на сканах.

Количественная оценка распределений с помощью параметров Sa и Sq позволяет определить специфику изображений и оценить произошедшие при модификации поверхности изменения. Средняя шероховатость Sa определяется как среднее арифметическое отклонение профиля от средней наклонной прямой или плоскости, проведенной методом наименьших квадратов. Среднеквадратичная шероховатость Sq характеризует среднеквадратичное отклонение профиля поверхности относительно базовой линии. Можно ожидать существенное расхождение этих параметров δ и увеличение значения Sa по сравнению с Sq :

$$\delta = \frac{(Sq - Sa)}{Sq} \cdot 100\%, \quad (2)$$

если на анализируемом скане имеются единичные локализованные, выделяющиеся на общем фоне неровности.

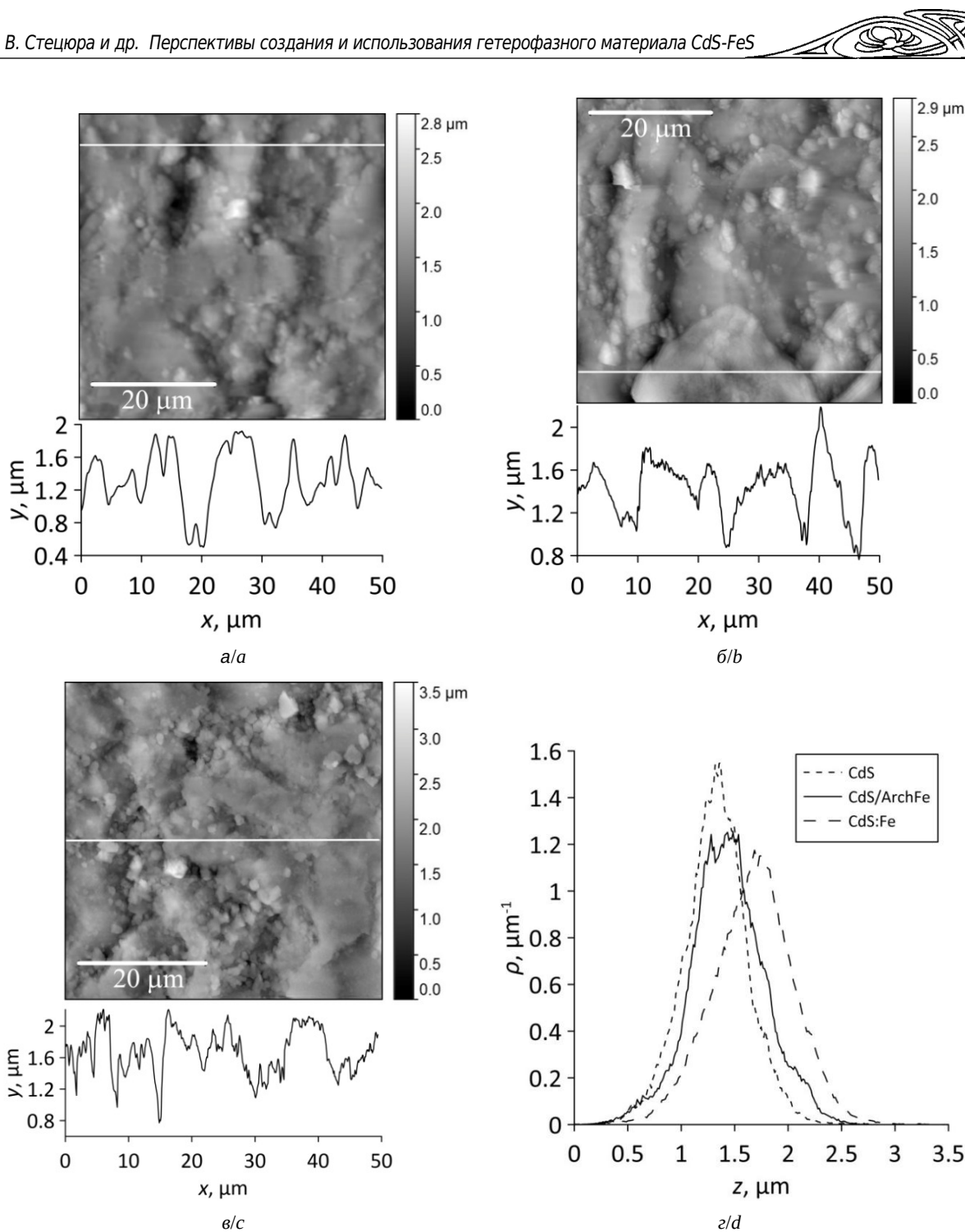


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности и профили вдоль линии для CdS (а), CdS/ArchFe до отжига (б) и гетерофазного материала CdS:Fe (в). Распределения высот неровностей для поверхностей CdS, CdS/ArchFe и CdS:Fe (г)

Fig. 2. AFM images of the surface and profiles along the line for CdS (a), CdS/ArchFe before annealing (b) and heterophase material CdS:Fe (c). Distributions of roughness heights for CdS, CdS/ArchFe and CdS:Fe surfaces (d)

При изменении значений Sa или Sq , связанных с нанесением покрытия или другой модификацией поверхности, слабое изменение этих величин говорит о том, что покрытие равномерно лежит на поверхности, практически повторяя его рельеф. Относительные изменения Sa и Sq

в процентах, полученные при переходе от анализа распределения высот на поверхности «чистого» CdS к анализу поверхности структуры с нанесенным покрытием CdS/ArchFe (до отжига), обозначим как Δ_1 . После отжига относительные изменения Sa и Sq поверхности гетерофазного



Статистические параметры АСМ изображений поверхностей «чистого» CdS, структуры с нанесенным покрытием CdS/ArchFe (до отжига) и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ ArchFe
Statistical parameters of AFM images of the surfaces of “pure” CdS, a structure with a CdS/ArchFe coating (before annealing) and a heterophase CdS:Fe material obtained by annealing the CdS/ArchFe structure

Параметры	CdS	CdS/ArchFe	CdS:Fe	$\Delta_1, \%$	$\Delta_2, \%$
Sq	297.7 нм	331.1 нм	379.9 нм	11.2	27.6
Sa	231.1 нм	260.6 нм	298.6 нм	12.7	29.2
$\delta, \%$	22.4	21.3	21.4	–	–
a	–0.011	–0.006	–0.094	–	–

материала CdS:Fe относительно немодифицированной поверхности CdS обозначим как Δ_2 .

Анализ значений Δ_1 и Δ_2 дает информацию о том, насколько существенные изменения модификация поверхности внесла в рельеф поверхности. Из таблицы следует, что Sq и Sa для исследуемых поверхностей на первый взгляд различаются значительно ($\delta = 21\text{--}22\%$), но эти различия обусловлены неровностями исходной подложки CdS, нанесение покрытия и отжиг не приводят к увеличению δ , т. е. все изменения происходят равномерно по всей поверхности, что подтверждается при визуальном анализе фрагментов рис. 2.

Анализируя значения Δ_1 и Δ_2 , можно сделать следующий вывод: относительное увеличение шероховатости, вызванное нанесением пленки арахината железа Δ_1 , составило на АСМ-сканах: для Sa 12.7% и для Sq 11.2%, т. е. незначительная разница между Δ_1 и Δ_2 говорит о достаточно хорошей однородности слоя арахината железа по толщине и равномерном его распределении по подложке CdS при нанесении. Но значения Δ_2 приближаются к 30%, т. е. рельеф поверхности существенно поменялся после отжига и это также видно при визуальном сравнении рис. 2, а и рис. 2, в.

2.2. Результаты измерений фотоэлектрических характеристик и их обсуждение

ВАХ монокристаллической подложки CdS в сравнении с ВАХ неотожженной двухслойной структуры CdS/ArchFe, измеренные в темноте и при освещении в режиме поперечной фотопроводимости, были приведены и подробно проанализированы нами в [19]. Было показано, что характер изменения токов при освещении и в темноте не меняется при нанесении покрытия ArchFe, кратность изменения на свету сопротивления гибридной структуры CdS/ArchFe, т. е. её фоточувствительность, остается на прежнем уровне, причем значения и темновых и фототоков

незначительно, но снижаются, что объяснялось наличием на поверхности CdS слоя ArchFe.

В данной статье исследование продолжены и расширены, и на рис. 3 приведены результаты измерений зависимостей тока от напряжения в темноте и при освещении для образцов «чистого» CdS и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe, также в поперечном режиме фотопроводимости, наиболее полно отражающем изменения, произошедшие после образования включений FeS.

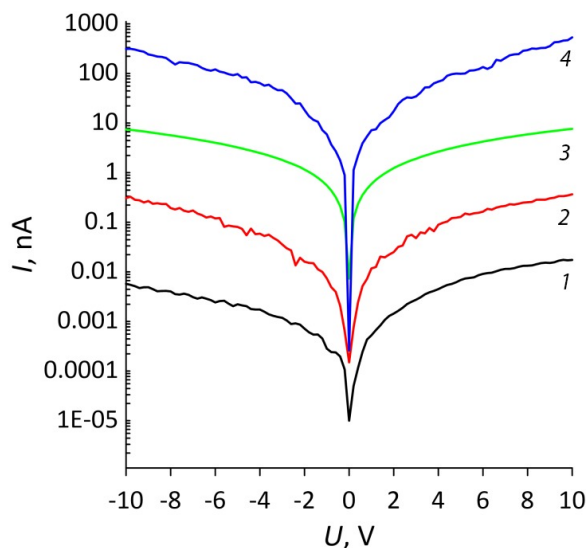


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики, построенные в полулогарифмическом масштабе, для образцов «чистого» CdS (кривые 1, 3) и гетерофазного материала CdS:Fe (кривые 2, 4), измеренные в темноте (кривые 1, 2) и при освещении (кривые 3, 4) (цвет онлайн)

Fig. 3. Current-voltage characteristics plotted on a semi-logarithmic scale for samples of «pure» CdS (curves 1, 3) and heterophase material CdS:Fe (curves 2, 4), measured in the dark (curves 1, 2) and under illumination (curves 3, 4) (color online)

Полулогарифмический масштаб рис. 3 позволил отобразить на одном графике ВАХ в темноте и при освещении и визуализировать высокую фоточувствительность исследуемых образцов как до модификации, так и после отжига. При этом



стал менее заметен тот факт, что если ВАХ «чистого» CdS (кривые 1 и 3) стремятся к насыщению (особенно при освещении) и при положительном, и при отрицательном смещении, то для гетерофазного материала CdS:Fe участки насыщения на ВАХ при освещении в рассматриваемом диапазоне напряжений отсутствуют, кроме того, при напряжениях выше 5 В крутизна ВАХ увеличивается настолько, что прирост тока при увеличении напряжения значительно (более чем в 2 раза при значении напряжения ± 10 В) превышает линейную аппроксимацию данной зависимости, т. е. ВАХ становится «сверхлинейной» (кривая 4).

Подобный эффект был ранее замечен на гетерофазных материалах CdS-PbS [24] и объяснялся снижением скорости рекомбинации неравновесных носителей заряда за счет оттока радиационных и технологических дефектов в наноразмерные включения PbS. В данном случае изменение характера ВАХ образца CdS при освещении после легирования его железом можно рассматривать как косвенное подтверждение ранее установленного факта образования нановключений FeS [13]. В результате изменения характера «световой» ВАХ для образца CdS:Fe кратность изменения его сопротивления при освещении (и, соответствен-

но, интегральная фоточувствительность, т. е. чувствительность к белому свету) возросла в 70 раз по сравнению с «чистым» CdS – так при напряжении ± 10 В темновые токи равны $1.57 \cdot 10^{-2}$ нА и $3.29 \cdot 10^{-1}$ нА, а токи при освещении возрастают до значений 6.87 нА и 480 нА для CdS и CdS:Fe, соответственно. Таким образом, интегральная фоточувствительность в диапазоне ± 10 В при освещенности 20000 лк для образцов CdS составила $3.42 \cdot 10^{-4}$ нА/лк, а для гетерофазных структур CdS:Fe выросла до значения $2.39 \cdot 10^{-2}$ нА/лк, т. е. почти на 2 порядка.

Помимо анализа ВАХ (стационарный подход) проводилось исследование кинетических характеристик тока при включении освещения интенсивностью 20000 лк на 10 минут с периодическим выключением света на 5 мин при постоянном напряжении –10 В. Полученные зависимости тока от времени представлены на рис. 4 и 5.

Для «чистого» CdS наблюдается типичная для этого материала медленная релаксация токов как после момента включения освещения, так и после его выключения. Выделенные пунктиром участки в моменты включения и выключения освещения были увеличены и приведены на вставках 1 и 2 к рис. 4. Их анализ показал, что после

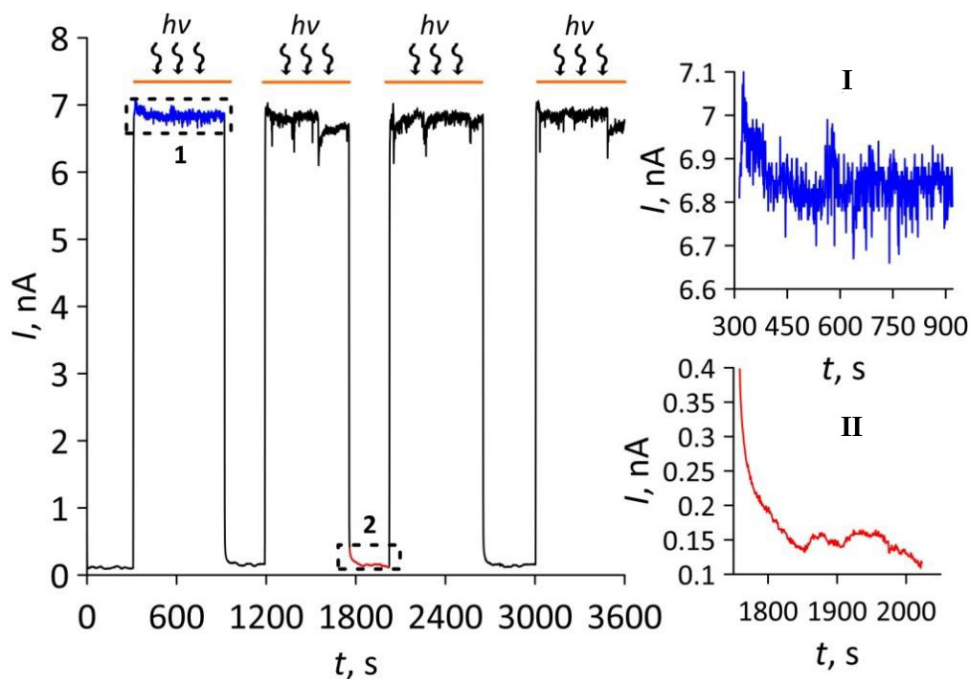


Рис. 4. Зависимость тока от времени для немодифицированного CdS при периодическом включении освещения. Пунктиром выделены, увеличены и показаны на вставках I и II участки включения (фрагмент 1) и выключения (фрагмент 2) освещения (цвет онлайн)

Fig. 4. Dependence of the current on time for unmodified CdS at a periodic switching on illumination. The areas of switching on (fragment 1) and switching off (fragment 2) illumination are highlighted with the dashed line, enlarged and shown in insets I and II (color online)



выключения света ток уменьшается первые 2 минуты со скоростью около 3 пА/с (выделенная область 2 на рис. 4). Это приводит к значительному размытию фронта импульса тока после выключения освещения и уменьшению темнового тока более чем в 3 раза за 5 мин выдержки образца в темноте. При включении освещения наблюдается небольшая (до 3%) фотоутомляемость (уменьшение тока во времени при фиксированной освещенности [25]), что хорошо видно на выделенной области 1 рис. 4). Это негативно отражается на фоточувствительности материала. При этом от импульса к импульсу значения световых и темновых токов практически не менялись.

Для гетерофазного образца CdS:Fe вид зависимости тока от времени при периодическом включении освещения заметно изменился по сравнению с «чистым» CdS (рис. 5). При включении освещения наблюдается существенная неустойчивость значений тока и, кроме того, фототок как в течение одного импульса, так и от импульса к импульсу имеет тенденцию к росту, а не к уменьшению: за время импульсного освещения (суммарно 40 мин) рост фототока составил почти 60% от первоначального значения.

Подобный эффект, получивший название «отрицательная фотоутомляемость» [24], наблюдался ранее несколькими группами авторов в гетерофазных материалах на основе CdS [24, 25] и объяснялся наличием узкозонных наноразмер-

ных включений [24] и протеканием специфических фотохимических реакций [25]. В темноте наблюдается релаксация тока, но изменения тока менее значительные, чем для «чистого» CdS, что также вписывается в модель гетерофазного фотопроводника с наноразмерными проводящими включениями [24].

Неупорядоченные низкочастотные осцилляции фототока объясняются тем, что, как было показано в пункте 1.1.2, на поверхности осталось незначительное количество Fe, что при приложении напряжения к образцу привело к неравномерному распределению поверхностного потенциала. При этом эквивалентную схему, отражающую основные физические процессы в приповерхностном слое CdS:Fe, можно представить как цепочку конденсаторов, шунтированных сопротивлением, резко понижающимся при освещении. Ввиду малой емкости «конденсаторов» и больших сопротивлений утечки при освещении наблюдаются периодические процессы зарядки – разрядки «конденсаторов», приводящие к неустойчивости фототока, наблюдаемой на рис. 5. Поскольку неуправляемые биения фототока являются нежелательными, необходимо внести изменения в технологический режим (например, можно увеличить время отжига или уменьшить количество наносимых монослоев ArchFe). Увеличивать температуру отжига не целесообразно из-за ускорения процессов окисления Cd и Fe и образования

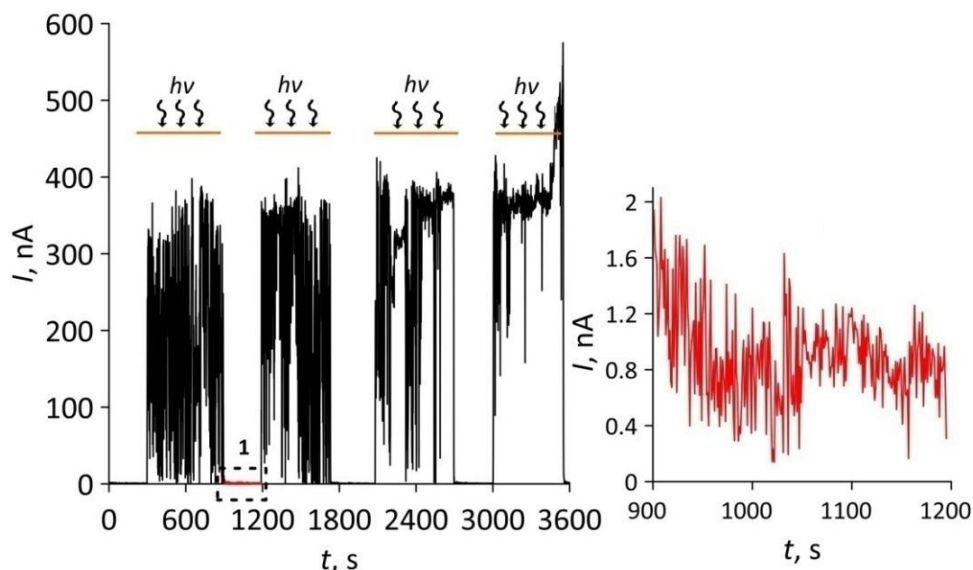


Рис. 5. Зависимость тока от времени для гетерофазного материала CdS:Fe при периодическом включении освещения. Пунктиром выделен, увеличен и показан на вставке участок выключения освещения (цвет онлайн)

Fig. 5. Dependence of the current on time for heterophase material CdS:Fe at a periodic switching on illumination. The area of switching off illumination is highlighted by the dashed line, enlarged and shown in inset (color online)



нефоточувствительных в видимой области спектра оксидов этих металлов.

Заключение

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что метод получения материала CdS:Fe, обладающего свойствами ПМП, при использовании технологии Ленгмюра–Блоджетт полностью воспроизводим, позволяет создавать гетерофазный материал с нановключениями фазы FeS. Требуется доработка метода, позволяющая удалять остатки атомов железа с поверхности CdS. Но уже на данном этапе показано, что полученный материал обладает уникальными свойствами, такими как повышенная фоточувствительность и отрицательная фотоутомляемость, что весьма перспективно при создании устройств (например, светоадресуемых биосенсоров), работающих в условиях постоянного интенсивного освещения, характеристики которых могут настраиваться и регулироваться освещением.

Список литературы

1. Роках А. Г. Сублимированные фотопроводящие пленки типа CdS: история и современность // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2015. Т. 15, вып. 2. С. 53–58. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2015-15-2-53-58>
2. Singh V. P., Singh R. S., Sampson K. E. Chapter 6. Thin-Film Solar Cells Based on Nanostructured CdS, CIS, CdTe and Cu₂S // Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion / ed. Tetsuo Soga. Elsevier, 2006. P. 167–190. <https://doi.org/10.1016/B978-044452844-5/50007-X>
3. Hao E., Sun H., Zhou Z., Liu J., Yang B., Shen J. Synthesis and Optical Properties of CdSe and CdSe/CdS Nanoparticles // Chemistry of Materials. 1999. Vol. 11, iss. 11. P. 3096–3102. <https://doi.org/10.1021/cm990153p>
4. Obaid A. S., Mahdi M. A., Hassan Z. Preparation of chemically deposited thin films of CdS/PbS solar cell // Superlattices and Microstructures. 2012. Vol. 52, iss. 4. P. 816–823. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2012.06.024>
5. Салманов В. М., Гусейнов А. Г., Джафаров М. А., Мамедов Р. М., Мамедова Т. А. Особенности фотопроводимости и люминесценции тонких пленок CdS и твердых растворов Cd_{1-x}Zn_xS при лазерном возбуждении // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130, вып. 10. С. 1567–1570. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.10.53627.2983-22>
6. Маскаева Л. Н., Федорова Е. А., Марков В. Ф. Технология тонких пленок и покрытий : учеб. пособие / под ред. Л. Н. Маскаевой. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2019. 236 с.
7. Смирнов Б. М. Металлические наноструктуры: от кластеров к нанокатализу и сенсорам // Успехи физических наук. 2017. Т. 187, № 12. С. 1329–1364. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.02.038073>
8. Nabok A. V., Richardson T., Davis F., Stirling C. J. M. Cadmium sulfide nanoparticles in Langmuir–Blodgett films of calixarenes // Langmuir. 1997. Vol. 13, iss. 12. P. 3198–3201. <https://doi.org/10.1021/la962115f>
9. Li L., Lou Z., Shen G. Hierarchical CdS Nanowires Based Rigid and Flexible Photodetectors with Ultrahigh Sensitivity // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. Vol. 7, iss. 42. P. 23507–23514. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06070>
10. Hwang I., Yong K. Novel CdS Hole-Blocking Layer for Photostable Perovskite Solar Cells // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. Vol. 8, iss. 6. P. 4226–4232. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b12336>
11. Halge D. I., Narwade V. N., Khanzode P. M., Dadge J. W., Banerjee I., Bogle K. A. Enhancement in Visible Light Photoresponse of CdS Thin Films by Nitrocellulose Surface Passivation // ACS Applied Electronic Materials. 2020. Vol. 2, iss. 7. P. 2151–2154. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c00361>
12. Hernadez-Borja J., Vorobiev Y. V., Ramirez-Bon R. Thin films solar cells of CdS/PbS chemically deposited by an ammonia – free process // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. Vol. 95, iss. 7. P. 1882–1888. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.02.012>
13. Стецюра С. В., Харитонова П. Г., Маляр И. В. Полумагнитное пленочное покрытие на основе фоточувствительного полупроводника // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 66–72.
14. Никитин П. И., Савчук А. И. Эффект Фарадея в полумагнитных полупроводниках // Успехи физических наук. 1990. Т. 160, № 11. С. 167–196.
15. Мельничук С. В., Никитин П. И., Савчук А. И., Трифоненко Д. Н. Эффект Фарадея в полумагнитном полупроводнике Cd_{1-x}Fe_xTe // Физика и техника полупроводников. 1996. Т. 30, вып. 10. С. 1831–1837
16. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G. Magnetic properties of heterophase film coatings based on a solid solution of cadmium sulfide and iron // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, no. 1.2. P. 236–240. <https://doi.org/10.18721/JPM.161.236>
17. Ekrami M., Magna G., Emam-Djomeh Z., Saeed Yarmand M., Paolesse R., Di Natale C. Porphyrin-Functionalized Zinc Oxide Nanostructures for Sensor Applications // Sensors. 2018. Vol. 18, iss. 7. Art. 2279. <https://doi.org/10.3390/s18072279>
18. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Glukhovskoy E. G. Langmuir–Blodgett technology to obtain semi-magnetic photosensitive materials // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15, iss. 3.3. P. 250–254. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.349>
19. Харитонова П. Г., Глуховской Е. Г., Козловский А. В., Стецюра С. В. Фотоэлектрические характеристики и морфология поверхности сульфида кадмия, модифицированного арахином железа // Физика



- и техника полупроводников. 2023. Т. 57, № 7. С. 518–521. <https://doi.org/10.61011/FTP.2023.07.56780.4912C>
20. Kanicky J. R., Shah D. O. Effect of degree, type, and position of unsaturation on the pKa of long-chain fatty acids // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002. Vol. 256, iss. 1. P. 201–207. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8009>
21. Hwan Ha T., Kyu Kim D., Choi M. U., Kim K. Influence of Poly(ethylenimine) on the Monolayer of Oleic Acid at the Air/Water Interface // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2000. Vol. 226, iss. 1. P. 98–104. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.6819>
22. Khomutov G. B., Bykov I. V., Gainutdinov R. V., Polyakov S. N., Sergeyev-Cherenkov A. N., Tolstikhina A. L. Synthesis of Ni-containing nanoparticles in Langmuir–Blodgett films // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2002. Vol. 198–200. P. 559–567. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00961-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00961-X)
23. Харитонова П. Г., Сердобинцев А. А., Стецюра С. В. Применение масс-спектрометрических исследований для оптимизации модели биосенсорной структуры с гетерофазным преобразователем сигнала // *Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2023 : сб. статей Всероссийской школы-семинара / под ред. проф. Ан. В. Скрипаля. Саратов : Изд-во «Саратовский источник», 2023. С. 126–129.*
24. Роках А. Г., Стецюра С. В., Сердобинцев А. А. Гетерофазные полупроводники под действием излучений // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика*. 2005. Т. 5, вып. 1. С. 92–102. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2005-5-1-92-102>
25. Шейнкман М. К., Корсунская Н. Е. Фотохимические реакции в полупроводниках типа A2B6 // *Физика соединений A2B6 / под ред. А. Н. Георгобиани, М. К. Шейнкмана. М. : Наука, 1986. С. 109–145.*
5. Salmanov V. M., Guseinov A. G., Jafarov M. A., Mamedov R. M., Mamedova T. A. Features of photoconductivity and luminescence of CdS thin films and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ solid solutions under laser excitation. *Optics and Spectroscopy*, 2022, vol. 130, iss. 10, pp. 1308–1311. <https://doi.org/10.21883/eos.2022.10.54868.2983-22>
6. Maskaeva L. N., Fedorova E. A., Markov V. F. *Tekhnologiya tonkikh plenok i pokrytii: ucheb. posobie* [Maskaeva L. N., ed. Technology of thin films and coatings: A study guide]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2019. 236 p. (in Russian).
7. Smirnov B. M. Metal nanostructures: From clusters to nanocatalysis and sensors. *Physics-Uspekhi*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 1236–1267 (in Russian). <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.02.038073>
8. Nabok A. V., Richardson T., Davis F., Stirling C. J. M. Cadmium sulfide nanoparticles in Langmuir–Blodgett films of calixarenes. *Langmuir*, 1997, vol. 13, iss. 12, pp. 3198–3201. <https://doi.org/10.1021/la962115f>
9. Li L., Lou Z., Shen G. Hierarchical CdS Nanowires Based Rigid and Flexible Photodetectors with Ultrahigh Sensitivity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, vol. 7, iss. 42, pp. 23507–23514. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06070>
10. Hwang I., Yong K. Novel CdS Hole-Blocking Layer for Photostable Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, vol. 8, iss. 6, pp. 4226–4232. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b12336>
11. Halge D. I., Narwade V. N., Khanzode P. M., Dadge J. W., Banerjee I., Bogle K. A. Enhancement in Visible Light Photoresponse of CdS Thin Films by Nitrocellulose Surface Passivation. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, vol. 2, iss. 7, pp. 2151–2154. <https://doi.org/10.1021/acsaeml.0c00361>
12. Hernandez-Borja J., Vorobiev Y. V., Ramirez-Bon R. Thin films solar cells of CdS/PbS chemically deposited by an ammonia – free process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, vol. 95, iss. 7, pp. 1882–1888. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.02.012>
13. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Malyar I. V. Semimagnetic film coating based on a photosensitive semiconductor. *Applied Physics*, 2020, no. 5, pp. 66–72.
14. Nikitin P. I., Savchuk A. I. The Faraday effect in semimagnetic semiconductors. *Soviet Physics Uspekhi*, 1990, vol. 33, no. 1, pp. 974–989 (in Russian). <https://doi.org/10.1070/PU1990v033n11ABEH002659>
15. Mel'nichuk S. V., Nikitin P. I., Savchuk A. I., Trifonenko D. N. Faraday effect in semimagnetic $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ semiconductor. *Semiconductors*, 1996, vol. 30, no. 1, pp. 959–961.
16. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G. Magnetic properties of heterophase film coatings based on a solid solution of cadmium sulfide and iron. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2023, vol. 16, no. 1.2, pp. 236–240. <https://doi.org/10.18721/JPM.161.236>
17. Ekrami M., Magna G., Emam-Djomeh Z., Saeed Yarmand M., Paolesse R., Di Natale C. Porphyrin-Functionalized Zinc Oxide Nanostructures for Sensor Ap-



- plications. *Sensors*, 2018, vol. 18, iss. 7, art. 2279. <https://doi.org/10.3390/s18072279>
18. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Glukhovskoy E. G. Langmuir–Blodgett technology to obtain semi-magnetic photosensitive materials. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2022, vol. 15, iss. 3.3, pp. 250–254. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.349>
 19. Kharitonova P. G., Glukhovskoy E. G., Kozłowski A. V., Stetsyura S. V. Photoelectric characteristics and surface morphology of cadmium sulfide modified by iron arachidate. *Semiconductors*, 2023, vol. 57, iss. 7, pp. 510–513. <https://doi.org/10.61011/SC.2023.07.57411.4912C>
 20. Kanicky J. R., Shah D. O. Effect of degree, type, and position of unsaturation on the pKa of long-chain fatty acids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, vol. 256, iss. 1, pp. 201–207. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8009>
 21. Hwan Ha T., Kyu Kim D., Choi M. U., Kim K. Influence of Poly(ethylenimine) on the Monolayer of Oleic Acid at the Air/Water Interface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, vol. 226, iss. 1, pp. 98–104. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.6819>
 22. Khomutov G. B., Bykov I. V., Gainutdinov R. V., Polyakov S. N., Sergeyev-Cherenkov A. N., Tolstikhina A. L. Synthesis of Ni-containing nanoparticles in Langmuir–Blodgett films. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, vol. 198–200, pp. 559–567. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00961-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00961-X)
 23. Kharitonova P. G., Serdobintsev A. A., Stetsyura S. V. Application of mass spectrometric studies to optimize a model of a biosensor structure with a heterophase signal transducer. *Metody komp'yuternoi diagnostiki v biologii i meditsine – 2023: Sbornik statei Vserossiiskoi shkoly-seminara. Pod red. An. V. Skripalia* [Skripal An. V., ed. Methods of Computer Diagnostics in Biology and Medicine – 2023: Collection of articles of the All-Russian school-seminar]. Saratov, Izdatelstvo “Saratovskii istochnik”, 2023, pp. 126–129 (in Russian).
 24. Rokakh A. G., Stetsyura S. V., Serdobintsev A. A. Heterophase semiconductors under action of irradiations. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2005, vol. 5, iss. 1, pp. 92–102. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2005-5-1-92-102> (in Russian).
 25. Sheinkman M. K., Korsunskaya N. E. Photochemical reactions in semiconductors of A2B6 type. In: *Fizika soedinenii A2B6* [Georgobiani A. N., Sheinkman M. K., eds. Physics of Compounds A2B6]. Moscow, Nauka, 1986. pp. 109–145 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.06.2024; одобрена после рецензирования 05.08.2024;
принята к публикации 02.09.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 19.06.2024; approved after reviewing 05.08.2024;
accepted for publication 02.09.2024; published 31.03.2025



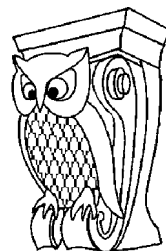
Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 106–112

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 106–112

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-106-112>, EDN: VZFIRB

Научная статья
УДК 537.311.322



Компьютерное моделирование флуктуаций проводимости в динамической перколяционной модели на основе резистивных сеток

Л. А. Кочкуров^{1✉}, Д. А. Зимняков^{1,2}

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24

Кочкуров Леонид Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем», lkochkurov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3360-8878>

Зимняков Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, ¹профессор, заведующий кафедрой физики; ²главный научный сотрудник, zimnyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования динамической перколяционной системы в форме трехмерной прямоугольной решетки с резистивной проводимостью между узлами. Проводимость подобной системы при подходе к порогу перколяции вычисляется на основе численного решения уравнений Кирхгофа для каждого из узлов решетки. Флуктуации проводимости системы обусловлены тем, что при фиксированном общем числе непроводящих узлов часть проводящих узлов обменивалась местами с соседними непроводящими узлами на каждом шаге моделирования. Полученные модельные функции спектральной плотности флуктуаций проводимости системы характеризуются однородным распределением спектральной плотности в низкочастотной области и степенным убыванием в области высоких частот с показателем, уменьшающимся по мере роста скорости обмена узлов в системе.

Ключевые слова: проводимость, динамическая перколяционная система, флуктуации проводимости, порог протекания

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-22-00333).

Для цитирования: Кочкуров Л. А., Зимняков Д. А. Компьютерное моделирование флуктуаций проводимости в динамической перколяционной модели на основе резистивных сеток // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 106–112. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-106-112>, EDN: VZFIRB

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Computer simulation of conductivity fluctuations in a dynamic percolation model based on resistive networks

L. A. Kochkurov^{1✉}, D. A. Zimnyakov^{1,2}

¹Yury Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

²Institute for Problems of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia

Leonid A. Kochkurov, lkochkurov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3360-8878>

Dmitry A. Zimnyakov, zimnyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>

Abstract. Background and Objectives: Percolation models are widely used in the analysis of electrical, thermophysical and other properties of various systems with disordered structure, which causes their wide application in the theoretical consideration of near-critical behavior of such systems in various fields of modern science and technology. Studies of noise processes, in particular noise, in the context of percolation networks have significantly extended the understanding of how fluctuations can arise in this kind of systems. An important aspect that has often received less attention in classical approaches is the fact that local conductivity processes in a number of disordered materials occur in a dynamic environment. In this paper, we present results from computer simulations of fluctuations in the conductivity of a time-evolving random resistor network. The model calculates the conductance of a three-dimensional rectangular lattice in which about 70% of the total number of nodes is empty, corresponding to a percolation threshold. **Materials and Methods:** The modeled percolation network consists of 160000 nodes, connected in a three-dimensional rectangular lattice. A potential difference is applied to the opposite edges of the lattice along the long side containing each node, providing charge transfer in the system. The value of bond conductivity in the lattice could take either zero or finite value (two-phase system). The numerical value of the potential for each node and the current at each site are calculated by solving Kirchhoff's equations. Dynamics was introduced into the system by assuming that a small fraction of the whole nodes are able to diffuse through the lattice, thus changing the conduction paths, but keeping on the other hand the total fraction of the conducting phase unchanged. **Results:** The process of exchange between neighboring conducting and non-conducting nodes between each other in space has been simulated, after which the conductivity of the network



has been recalculated. After repeating this process many times, temporal realizations of the conductivity fluctuations have been obtained, which allows a systematic analysis of the system dynamics. The characteristic lifetime τ reflects the reconfiguration time of the conductive part of the grid. In the limit of high exchange rate $\nu \rightarrow 1$ it is expected that the power spectral density of the conductivity fluctuations will be white noise **Conclusion:** The results are of particular interest for advancing fundamental understanding of charge transfer mechanisms in dispersed semiconductor materials, which are relevant to chemoresistive sensing and catalytic chemistry.

Keywords: conductivity, dynamic percolation system, conductivity fluctuations, percolation threshold

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-22-00333).

For citation: Kochkurov L. A., Zimnyakov D. A. Computer simulation of conductivity fluctuations in a dynamic percolation model based on resistive networks. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 106–112 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-106-112>, EDN: VZFIRB

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Перколяционные модели широко применяются при анализе электрических, теплофизических и прочих свойств различных систем с неупорядоченной структурой, что обуславливает их широкое использование в теоретическом рассмотрении околокритического поведения подобных систем в различных областях современной науки и техники [1–6]. Часто анализируется так называемая двухфазная система, в которой узлы могут находиться в одном из двух состояний: либо проводящем, либо непроводящем. Порогом перколяции принято считать минимальную долю проводящих узлов, необходимую для формирования непрерывного кластера, который представляет собой путь по бесконечной сети сопротивлений.

Ключевым аспектом, который зачастую привлекает к себе меньше внимания в классических подходах, является то, что процессы локальной проводимости в ряде неупорядоченных материалов протекают в условиях динамического окружения. В таких системах процессы переноса заряда, тепла и др. характеризуются флуктуациями, статистические и частотные характеристики которых зависят как от текущего состояния структуры системы, так и от динамики локальных перестроек в ней. Данный фактор требует детального рассмотрения, поскольку он может оказывать ощутимое влияние на характеристики проводимости подобных систем вблизи порога перколяции как на микроскопическом, так и на макроскопическом уровнях. Изучение шумовых процессов такого рода, в частности $1/f$ шума, в контексте перколяционных сетей существенно расширили понимание того, каким образом флуктуации могут возникать в подобного рода системах. Исследования были проведены как на теоретическом [7–9], так и на экспериментальном уровне [10, 11]. Целью таких работ являлось не только выяснение природы флуктуаций проводимости в неупорядоченных системах,

но и разработка более точных теоретических моделей, способных объяснить наблюдаемые явления. Подобный эффект может быть смоделирован в форме потока событий обмена местами проводящих и непроводящих узлов в случайной резисторной сети. При этом предполагается, что общее число проводящих узлов в системе, определяющее отстройку системы от порога перколяции, остается неизменным.

В данной статье мы представляем результаты компьютерного моделирования флуктуаций проводимости, меняющейся во времени случайной резисторной сети. В модели рассчитывается проводимость трехмерной прямоугольной решетки, в которой порядка 30% от общего числа узлов способны проводить ток, что приблизительно соответствует порогу перколяции.

1. Описание модели

Моделируемая перколяционная сеть состоит из 160000 узлов ($L \times W \times H = 400 \times 20 \times 20$, где L – длина, W – ширина, H – высота сети), объединенных в трехмерную прямоугольную решетку. К противоположным границам решетки, содержащим по 400×20 узлов, прикладывается разность потенциалов, обеспечивающая перенос заряда в системе. Значение проводимости узлов в решетке могло принимать только два значения: 0 для непроводящих узлов; 1 для проводящих (двухфазная система). Выбор размеров сети $400 \times 20 \times 20$ узлов был обусловлен главным образом тем, что конфигурации схожего типа возможно встретить в реальных системах, как, например, в работах [12, 13], где подобного вида перколяционные сети могут присутствовать в форме проводящих каналов со стохастической структурой между двумя электродами различной полярности. Протяженность электродов многократно превосходит как межэлектродное расстояние, ассоциируемое с длиной проводящих каналов, так и высоту этих каналов. Сами проводящие каналы представляют собой слои



из плотноупакованных полупроводниковых наночастиц. Таким образом, сетка с размерами, выбранными в работе, может рассматриваться как идеализированная модель подобных межэлектродных каналов.

Сеть равномерно и случайным образом заполнялась проводящими и непроводящими узлами с плотностями заполнения p и $(1-p)$, соответственно. В качестве граничных условий полагалось, что потенциалы на каждой из контактных границ структуры известны заранее. Эффективная проводимость определялась как интегральный ток, проходящий через перколяционную структуру при единичной разности потенциалов между контактными границами структуры. Численное значение потенциала для каждого узла и тока на каждом участке рассчитываются путем решения уравнений Кирхгофа. В соответствии с законом сохранения тока алгебраическая сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла:

$$\sum_j I_{ij} = 0. \quad (1)$$

Исходя из закона Ома, каждая пара смежных узлов в перколяционной сети может быть описана соотношением между током и разностью потенциалов:

$$I_{ij} = (\varphi_i - \varphi_j) \cdot \sigma_{ij}, \quad (2)$$

где φ_i и φ_j – потенциалы в узлах i и j соответственно, а σ_{ij} – модельная проводимость между ними, которая определяется выражением:

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 g_{ij},$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i, j \text{ принадлежат проводящей фазе,} \\ 0, & \text{если } i \text{ или } j \text{ не принадлежат проводящей фазе,} \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_0 = \text{const}$.

Подставив выражение (2) в уравнение сохранения тока (1), мы можем получить систему линейных уравнений. Далее, путем решения системы линейных уравнений, полученных из законов Кирхгофа и Ома, можно определить распределение потенциала поля в узлах, а также рассчитать токи на каждом участке решетки. Это даёт возможность не только оценить эффективную проводимость системы, но и визуализировать распределение тока в зависимости от конфигурации проводящих и непроводящих узлов.

Динамика системы задавалась допущением, что два узла в перколяционной сети способны обмениваться местами друг с другом при условии, что один из них является проводящим, а другой – непроводящим. В этом случае пути проводимости изменяются, в то время как общая доля проводящей фазы остаётся неизменной. После этого проводимость сети пересчитывалась, и процедура повторялась для большого числа (порядка 6000) временных шагов, что приводило к получению временной реализации флуктуирующей проводимости перколяционной сети. Исследование подобного рода модели для случая двумерной перколяционной сети было проведено в работе [14]. Спектральная плотность мощности флуктуаций находилась при помощи стандартного алгоритма по формуле:

$$PSD = \frac{|FFT(G(t))|^2}{n^2}, \quad (4)$$

где $FFT(\dots)$ – функция быстрого преобразования Фурье; $G(t)$ – временная реализация флуктуаций проводимости; n – длина анализируемой последовательности, выражаемая в числе шагов по времени.

Известно, что проводимость двухфазной системы определяется мощностью скелета соединяющего кластера [13]. В контексте трехмерной перколяционной сети термин «проводящий скелет» относится к подмножеству перколяционного кластера, по которому протекает электрический ток. Для того, чтобы этот кластер мог проводить, он должен охватывать всю систему целиком, соединяя две противоположные ее границы. Количество узлов проводящего скелета в трехмерной перколяционной сети может быть функцией нескольких параметров, таких как размер решетки и порог перколяции. Для достаточно больших решеток свойства скелета становятся самоподобными и могут быть описаны с использованием законов масштабирования [15,16]. Структура проводящего скелета является фрактальной, что означает, что его размерность является дробной, а не целой. Для больших систем число узлов в проводящем скелете N_{bb} обычно масштабируется с размером системы L с фрактальной размерностью d_{bb} .

$$N_{bb} \propto L^{d_{bb}}. \quad (5)$$

Величина L фактически определяется количеством узлов вдоль наибольшей грани сети. Для трехмерных перколяционных сетей фрактальная размерность проводящего скелета d_{bb} составляет



величину порядка 1.77 [17, 18]. Этот закон масштабируемости дает общее представление о том, как растет число узлов с ростом размера решетки. Для получения более точных значений для решеток конечных размеров обычно используют компьютерные методы эксперимента с непосредственным подсчетом количества узлов.

2. Численные результаты

В то время, как для бесконечно большой решетки на пороге перколяции будет существовать только единственный проводящий канал, охватывающий всю решетку, в решетке конечных размеров может существовать множество каналов, соединяющих на пороге перколяции контактные границы. Для расчета количества проводящих каналов в случае, когда имеется система с заранее заданными размерами удобнее всего, на наш взгляд, воспользоваться подходами, основанными именно на численных исследованиях. Среднее число проводящих каналов зависит от размера системы и плотности заполнения. Фрагмент полученной временной реализации флуктуаций проводимости представлен на рис. 1, а. На рис. 1, б представлена гистограмма, отражающая выборочную вероятность обнаружения заданного числа проводящих каналов в процессе временного прогона из 6000 шагов. На каждом шаге обменивалось местами 10% от общего числа проводящих узлов. По нашим численным оценкам, выполненным путем прямого подсчета для трехмерной решетки размером на

пороге перколяции, максимальное количество проводящих каналов приблизительно равно 20 при их среднем числе, равном 11 (см. рис. 1, б).

Скорость обмена ν , определенная как доля проводящих узлов, обменивающихся с соседними непроводящими за один временной шаг, для данного случая составляла 0.1, что эквивалентно 10% от общего числа проводящих узлов. Для полной структуры подобная скорость соответствует случаю, при котором за один временной шаг происходит обмен порядка 512 узлов. Численные расчеты показывают, что при подходе к порогу перколяции ($p = 0.32$) общее количество проводящих узлов в системе составляет величину порядка 51200 для сети с размерами $400 \times 20 \times 20$. Принимая во внимание частотное распределение количества проводящих каналов, представленное на рис. 1, б, было установлено, что среднее число проводящих узлов, приходящихся на один проводящий канал приблизительно равно 700. Только через 20% из них протекает электрический ток, величина которого составляет 10% и более от максимума. Другими словами, 80% проводящих узлов в канале, соединяющем левую и правую границу структуры, принадлежат именно к «мертвым концам». Подсчет количества таких «мертвых концов» представляет собой довольно сложную задачу, выходящую за рамки данной работы.

На рис. 2 представлена функция спектральной плотности мощности, которая при данном значении скорости обмена связей $\nu = 0.01$ доста-

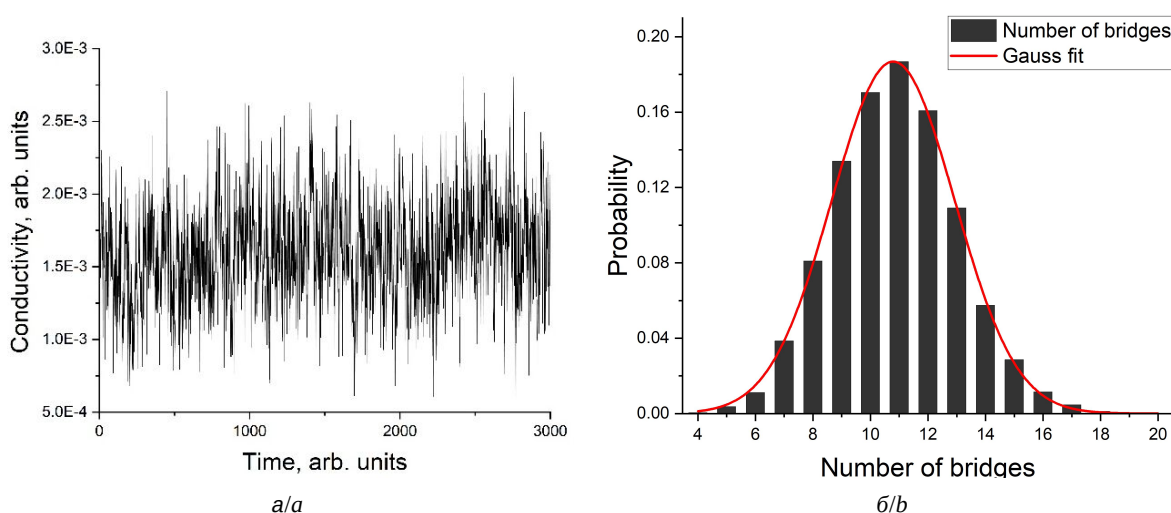


Рис. 1. Временная реализация проводимости (а) и гистограмма выборочной вероятности обнаружения заданного числа проводящих каналов при $p = 0.32$ (б). Сплошной линией показана аппроксимация функцией нормального распределения Fig. 1. Time realization of conductivity (a) and histogram of sampling probability of detection of a given number of conducting channels when $p = 0.32$ (b). The solid line shows the approximation by the normal distribution function of the random variable

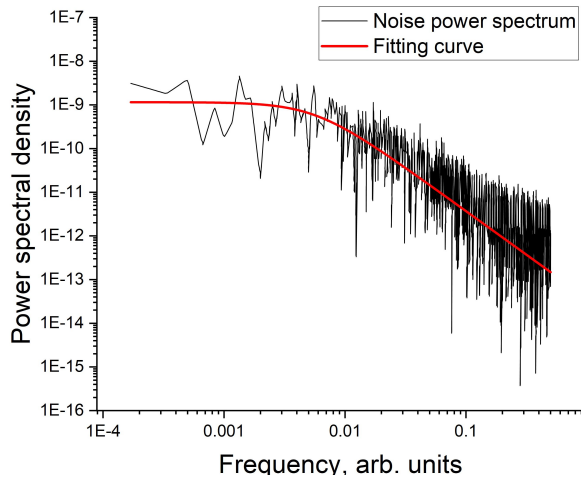


Рис. 2. Спектральная плотность мощности флуктуаций проводимости в логарифмических координатах для случая $\nu = 0.01$. Сплошная линия соответствует функции подгонки в форме уравнения (6) с показателем $\beta = 1.6$

Fig. 2. Power spectral density of conductivity fluctuations in logarithmic coordinates when $\nu = 0.01$. The solid line corresponds to the fitting function in the form of equation (6) with exponent $\beta = 1.6$

точно хорошо описывается функцией подгонки $S(f)$ (сплошная кривая) вида:

$$S(f) = S_0 \tau / [1 + (2\pi f \tau)^\beta], \quad (6)$$

где $S_0 = 4.1 \cdot 10^{-11}$ – мера амплитуды флуктуаций, $\tau = 20.1$ – характерное время реконфигурации структуры решетки, f – частота, представленная в безразмерных единицах, β – показатель наклона кривой $S(f)$ в логарифмических координатах в высокочастотной области при $f > f_c$ (для данного случая $\beta = 1.6$). Частота перегиба спектральной плотности, определяемая как $f_c = 1/\tau$, отделяет область белого шума при низких частотах от частотной зависимости вида $f^{-1.6}$ при высоких частотах. Путем вычисления временных реализаций проводимости и соответствующих им спектральных плотностей мощности при нескольких значениях скорости обмена узлами, была получена функция зависимости изменения характерного времени реконфигурации структуры решетки τ от скорости обмена узлов в решетке ν . Параметр ν с другой стороны может быть интерпретирован как изменение значения локальной проводимости сети с резистивными связями вследствие внешнего воздействия на систему. Так как скорость обмена узлами является единственным временным масштабом, который был введен в наше моделирование, логично предположить, что характерное время реконфигурации должно описываться выражением вида $\tau \propto 1/\nu$. Отметим, что при значении $\nu = 0.01$

величина τ приблизительно равна 20, т. е. коэффициент пропорциональности между τ и ν^{-1} может быть оценен как ≈ 0.2 . Были проведены оценки коэффициента пропорциональности между τ и ν^{-1} в интервале значений ν , перекрывающем 2 декады (от 0.001 до 0.1, рис. 3).

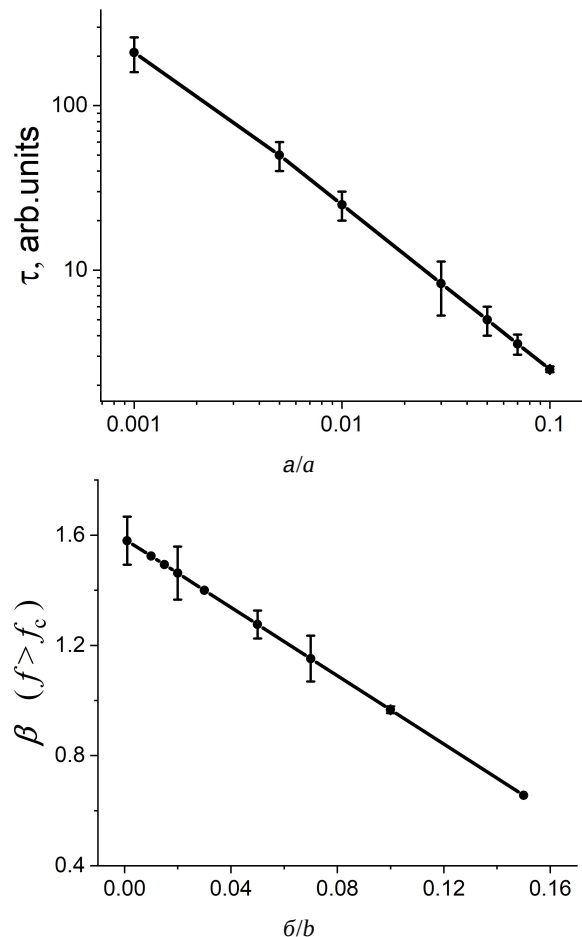


Рис. 3. Зависимость от скорости обмена узлами ν характерного времени реконфигурации структуры решетки τ (а) и коэффициента наклона β кривой спектральной плотности мощности флуктуаций проводимости в области $f > f_c$ (б). Доверительные интервалы соответствуют уровню значимости 0.9

Fig. 3. Dependence of the characteristic time of lattice structure reconfiguration τ on the node exchange rate ν (a); dependence of the slope coefficient β of the power spectral density curve of conductivity fluctuations in the region $f > f_c$ on the node exchange rate (b). Confidence intervals correspond to significance level of 0.9

Действительно, график зависимости τ от ν с логарифмическим масштабом по обоим осям (рис. 3, а) демонстрирует обратную линейную зависимость вида $\tau \approx k/\nu$, где $k \approx 0.2$ для скорости обмена узлами, лежащей в интервале $10^{-3} \leq \nu \leq 10^{-1}$. Также стоит отметить, что полученные модельные данные (рис. 3, б)



показывают систематическое убывание показателя наклона кривой спектральной плотности мощности на участке $f > f_c$ при возрастании доли узлов ν , обменивающихся местами друг с другом за один временной шаг. В пределе при $\nu \rightarrow 1$ ожидаемо, что спектральная плотность мощности флуктуаций проводимости будет представлять собой белый шум.

Одно из возможных интерпретаций константы пропорциональности κ в контексте измерения проводимости решетки заключается в следующем. Соединяющий кластер можно разделить по топологии, выделяя участки, формирующие так называемый скелет (остов соединяющего кластера), и «мертвые концы». Основная масса соединяющего кластера сосредоточена именно в «мертвых концах», которые, тем не менее, не играют роли в обеспечении проводимости. Эти области считаются бесполезными для передачи тока и не способствуют общей эффективной проводимости системы.

При наличии случайного обмена узлов в перколяционной сети вероятность присоединения проводящего узла к «мертвым концам» больше, чем к скелету. Это объясняется тем, что вероятность присоединения пропорциональна числу узлов, и в «мертвых концах» количество узлов значительно превышает таковое в скелете. Обменные процессы способствуют более частому взаимодействию проводящих узлов с «мертвыми концами». Проводимость соединяющего кластера в основном определяется мощностью его скелета, то есть только некоторые узлы проводящей нити (кластера) вносят вклад во флуктуацию и играют роль в формировании спектральной плотности мощности. Время, в течение которого флуктуации решетки становятся некоррелированными (спектральная плотность мощности в этот момент становится частотно независимой), определяется параметром τ , поэтому разумно положить, что τ также определяется временем, за которое большинство критических проводящих узлов обменивается местами. В этом смысле $\tau \cdot \nu = \kappa$ показывает отношение количество критических узлов к общему их количеству.

Заключение

Представлены результаты моделирования моделирования динамической случайной резисторной сети вблизи порога перколяции. Проводимость сети рассчитывалась путем численного решения уравнений Кирхгофа. Моделировался

процесс обмена между соседствующими проводящими и непроводящими узлами в пространстве, после чего проводимость сети пересчитывалась. После многократного повторения этого процесса были получены временные реализации флуктуаций проводимости, которые позволили систематически анализировать динамику системы. Спектральная плотность мощности флуктуаций проводимости в высокочастотной области хорошо описывается степенной зависимостью с показателем, на который оказывает влияние количество узлов, обменивающихся местами за один шаг. При малых значениях скорости обмена ν показатель наклона в высокочастотной области близок к значению ≈ 1.6 . При увеличении значения ν наблюдается уменьшение показателя спектральной плотности мощности флуктуаций проводимости в высокочастотной области. В пределе при $\nu \rightarrow 1$ показатель стремится к нулю, что характерно для белого шума.

Список литературы / References

1. Saberi A. A. Recent advances in percolation theory and its applications. *Physics Reports*, 2015, vol. 578, pp. 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.03.003>
2. Li M., Liu R.-R., Lü L., Hu M.-B., Xu S., Li Y. Z. Percolation on complex networks: Theory and application. *Physics Reports*, 2021, vol. 907, pp. 1–68. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.12.003>
3. Xu X., Wang J., Lv J.-P., Deng Y. Simultaneous analysis of three-dimensional percolation models. *Frontiers of Physics*, 2014, vol. 9, pp. 113–119. <https://doi.org/10.1007/s11467-013-0403-z>
4. Liu J., Regenauer-Lieb K. Application of percolation theory to microtomography of structured media: Percolation threshold, critical exponents, and upscaling. *Physical Review E*, 2011, vol. 83, iss. 1, art. 016106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.016106>
5. Hunt A., Ewing R., Ghanbarian B. *Percolation theory for flow in porous media*. Cham, Springer, 2014, XXIV+447 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03771-4>
6. Rammal R., Tannous C., Tremblay A. M. S. $1/f$ noise in random resistor networks: Fractals and percolating systems. *Physical Review A*, 1985, vol. 31, iss. 4, pp. 2662–2671. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.31.2662>
7. Rammal R., Tannous C., Breton P., Tremblay A. -M. S. Flicker ($1/f$) noise in percolation networks: A new hierarchy of exponents. *Physical Review Letters*, 1985, vol. 54, iss. 15, pp. 1718–1721. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.54.1718>
8. Blumenfeld R., Meir Y., Aharony A., Aharony A., Harris A. B. Resistance fluctuations in randomly diluted networks. *Physical Review B*, 1987, vol. 35, iss. 7, pp. 3524–3535. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.35.3524>
9. Garfunkel G. A., Alers G. B., Weissman M. B., Mochel J. M., VanHarlingen D. J. Universal-Conductance-



- Fluctuation $1/f$ Noise in a Metal-Insulator Composite. *Physical Review Letters*, 1988, vol. 60, iss. 26, pp. 2773–2776. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.2773>
10. Stephany J. F. Frequency limits of $1/f$ noise. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2000, vol. 12, iss. 11, pp. 2469–2483. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/12/11/313>
11. Nandi U. N., Mukherjee C. D., Bardhan K. K. $1/f$ noise in nonlinear inhomogeneous systems. *Physical Review B*, 1996, vol. 54, iss. 18, pp. 12903–12914. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.12903>
12. Zimnyakov D. A., Volchkov S. S., Vasilkov M. Y., Plugin I. A., Varezchnikov A. S., Gorshkov N. V., Ushakov A. V., Tokarev A. S., Tsypin D. V., Vereshagin D. A. Semiconductor-to-insulator transition in inter-electrode bridge-like ensembles of anatase nanoparticles under a long-term action of the direct current. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, iss. 9, art. 1490. <https://doi.org/10.3390/nano13091490>
13. Kochkurov L. A., Volchkov S. S., Vasilkov M. Y., Plugin I. A., Klimova A. A., Zimnyakov D. A. Degradation of conductivity of low-dimensional nanostructured semiconductor layers under long-term dc current flow. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 41–51 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-41-51>, EDN: AUQNB
14. Lust L. M., Kakalios J. Computer simulations of conductance noise in a dynamical percolation resistor network. *Physical Review E*, 1994, vol. 50, iss. 5, pp. 3431–3435. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.50.3431>
15. Gallyamov S. R., Melchukov S. A. Percolation model of two-phase lattice conductivity: Theory and computer experiment. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki*, 2010, iss. 4, pp. 112–122 (in Russian). <https://doi.org/10.20537/vm100413>
16. Bunde A., Havlin S., eds. *Fractals and disordered systems*. Berlin, Springer, 2012, XXII+408 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84868-1>
17. Feder J. *Fractals. Physics of Solids and Liquids*. New York, Springer, 2013. XXVI+284 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>
18. Herrmann H. J., Hong D. C., Stanley H. E. Backbone and elastic backbone of percolation clusters obtained by the new method of “burning”. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1984, vol. 17, iss. 5, pp. L261–L266. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/17/5/008>

Поступила в редакцию 27.09.2024; одобрена после рецензирования 12.11.2024;
принята к публикации 27.11.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 27.09.2024; approved after reviewing 12.11.2024;
accepted for publication 27.11.2024; published 31.03.2025

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 113–128
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 113–128
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-113-128>, EDN: XOMSFS

Научная статья
УДК 53(091):53(092)

Саратовские годы Олега Антонова: конструктор планеров и студент университета

М. Н. Шашкина¹, В. М. Аникин²✉

¹Государственный архив Саратовской области, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Кутякова, д. 15

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Шашкина Маргарита Николаевна, главный архивист отдела публикации документов и использования документов, член Союза журналистов РФ, ritaplus@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2075-3348>

Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиотехники и электродинамики, AnikinVM@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6506-6997>, AuthorID: 166229

Аннотация. В статье освещены эпизоды биографии выдающегося советского конструктора уникальных многоцелевых и грузовых самолетов Олега Константиновича Антонова (1906–1984), связанные с почти 15-летним периодом его жизни в Саратове. Приехав в Саратов вместе с родителями в 1911–1912 г., он получил здесь среднее образование, обучаясь в Первом Александро-Мариинском реальном училище (в дореволюционное время) и Единой трудовой школе. Уже в детские годы его отличало серьезное отношение к истории авиации (он составлял собственную летопись ее развития), стремление к созданию совершенных самолетов и мечта стать летчиком. Первым этапом его пути в небо в 1920-е гг. стало в Саратове конструирование планеров, в чем он достиг профессионального мастерства, публикуя, в частности, брошюры о моделировании и конструировании планеров. В 1922–1923 гг. Олег Антонов учился на первом курсе путейского факультета Саратовского университета (до его закрытия). Одновременно в Саратове он занимался организацией планерного дела, будучи с 1923 г. ответственным секретарем спортивной секции Общества друзей воздушного флота. Источниками для написания статьи явились материалы Государственного архива Саратовской области, Саратовского областного музея краеведения, архива Саратовского университета, воспоминания О. К. Антонова. Отмечается, что саратовский период жизни О. К. Антонова стал определяющим в его выборе дальнейшей учебы в Ленинградском политехническом институте и многолетней профессиональной деятельности. На доме, где он жил в Саратове, и на здании бывшего реального училища, где он учился, установлены в честь него памятные доски.

Ключевые слова: Олег Константинович Антонов, Саратовский университет, планеризм

Для цитирования: Шашкина М. Н., Аникин В. М. Саратовские годы Олега Антонова: конструктор планеров и студент университета // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 113–128. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-113-128>, EDN: XOMSFS

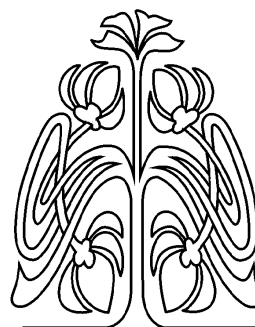
Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

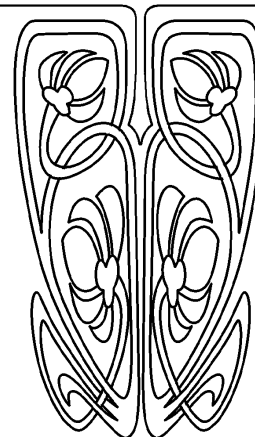
Oleg Antonov's Saratov years: Glider designer and university student

M. N. Shashkina¹, V. M. Anikin²✉

© Шашкина М. Н., Аникин В. М., 2025



УНИВЕРСИТЕТСКАЯ
ЛЕТОПИСЬ





¹ Saratov Region State Archives, 15 Kutyakova St., Saratov 410012, Russia

² Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Margarita N. Shashkina, ritaplus@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2075-3348>

Valery M. Anikin, AnikinVM@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6506-6997>, AuthorID: 166229

Abstract. Background and Objectives: In the article, we highlight episodes from the biography of the outstanding Soviet designer of unique multi-purpose and cargo aircraft Oleg K. Antonov (1906–1984), related to the almost 15-year period of his life in Saratov. Having arrived in Saratov with his parents in 1911–1912, he received his secondary education here, studying at the Alexander-Mariinsky Real School (in pre-revolutionary times) and the Unified Labor School. Even in his childhood, he was distinguished by a serious attitude to the history of aviation (he compiled his own chronicle of its development), aspiration to create perfect aircraft and a dream of becoming a pilot. The first stage of his path to the sky in the 1920s was the design of gliders in Saratov, in which he achieved professional mastery, publishing, in particular, brochures on the modeling and design of gliders. In 1922–1923, Oleg Antonov was a first-year student at the Faculty of Railway Engineering at Saratov University (until its closure). At the same time, in Saratov, he was engaged in organizing gliding, being the executive secretary of the sports section and gliding of the Society of Friends of the Air Fleet since 1923. **Materials and Methods:** By writing the article, we used the materials of the State Archives of the Saratov Region, the Saratov Regional Museum of Local History, the archives of the Saratov University, and the memoirs by O. K. Antonov. **Conclusion:** It has been noted that the Saratov period of Oleg K. Antonov's life became decisive in his choice of further study at the Leningrad Polytechnic Institute and many years of professional activity. On the house where he lived in Saratov and on the building of the former real school where he studied, memorial plaques were installed in his honor.

Keywords: Oleg K. Antonov, Saratov University, Gliding

For citation: Shashkina M. N., Anikin V. M. Oleg Antonov's Saratov years: Glider designer and university student. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 113–128 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-113-128>, EDN: XOMSF5

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Олег Константинович Антонов (1906–1984) известен как выдающийся советский авиаконструктор, создававший грузовые и многоцелевые самолеты высочайшей надежности, непревзойденных габаритов и грузоподъемности, отличающиеся оптимальным техническим и экономическим сочетанием структурных компонентов (прежде всего – двигателей) и рабочих характеристик (скорости, взлетно-посадочных качеств, удобства эксплуатации и т. д.). Всего, как отмечается в книге, подводящей итоги его работы за 60 лет, «лично и под руководством О. К. Антонова выполнено более 50 конструкторских разработок, спроектированы и построены десятки самолетов различного класса и назначения» [1, с. 7].

Путь в небо для О. К. Антонова начался в Саратове в конце 1910-х – начале 1920-х гг. с конструирования планеров. Его, тогда еще 18-летнего паренька, можно без преувеличения именовать «отцом» саратовского планеризма: он был ответственным секретарем спортивной секции Саратовского губернского отдела Общества друзей воздушного флота (ОДВФ), разрабатывал конструкции планеров, писал популярные брошюры и заметки по планеризму. В Саратове он получил среднее образование и один год, изучая математику и физику, проучился в Саратовском университете. Саратовскому периоду жизни авиаконструктора и посвящена данная статья.

«Первые жизненные удивления»

Родился Олег Константинович Антонов 7 февраля (25 января) 1906 г. в Подмоскowie – в деревне Троица Вороновской волости Подольского уезда Московской губернии. Его отец Константин Константинович был инженером-строителем. Мать Олега, Анна Ефимовна (урожденная Бикорюкина), имела превосходное образование, окончила гимназию и Бестужевские курсы в Петербурге. Дворянское (с гербом) происхождение, «доставшееся» от предков, Олегу Антонову в послереволюционное время могло создавать только сложности. Семья Антоновых (родители и дети – старшая сестра Ирина и Олег) переехала в Саратов, как считают, в 1911–1912 г. В девять лет, в 1915 г., Олег лишился матери, которая смертельно заразилась в госпитале, куда пошла сестрой милосердия с началом Первой мировой войны. В Саратове семья Антоновых в разные годы жила, по крайней мере, на трех квартирах [2]. После смерти Анны Ефимовны семья переехала в дом на улице Грошовой (современный адрес – ул. Дзержинского Ф. Э., 39).

Семейным центром притяжения всех Антоновых была бабушка Олега по отцу, Анна Александровна. В летнее время к ней в загородный дом съезжались родственники. И два события, произошедшие в доме бабушки в детские годы, определили, как сам считал Антонов, его судьбу [3–5].



Не нужно забывать, что начало XX столетия – это заря авиации. Достижения в самолетостроении и авиационные рекорды были в центре всеобщего внимания. Приехавший однажды из Москвы в Саратов старший двоюродный брат Олега красочно рассказывал о первом в мире перелете на самолете через пролив Ла-Манш между Францией и Англией, который совершил французский летчик Луи Блерио в 1909 г. Рассказ так глубоко захватил Олега, что ему страстно захотелось стать летчиком. В подарок от бабушки он получил авиаконструкторский набор. Отец же, поначалу без особого энтузиазма встретивший мечтания Олега, со временем принес ему одну из многочисленных популярных книг по авиации, написанную авиационным инженером, историком и популяризатором авиации К. Е. Вейгелиным¹.

Аристотелю приписывают такие слова: «Эмоции удивления – начало творческого отношения человека к окружающему миру и жизни в нем». Красиво выразилась по этому поводу писательница И. Радунская:

«Первые жизненные удивления... Как велико их влияние на жизнь человека, на созревание его разума, на пробуждение воображения... Мы не всегда знаем, к чему приводят эти юные потрясения, но когда знаем, это открывает нам секрет успеха многих великих людей»².

Быть собственно летчиком у О. К. Антонова не сложилось, но он неуклонно шел по параллельной дороге, став блестящим авиаконструктором. Этому, кстати, способствовало и второе «юное потрясение» Олега Антонова. Вот что он писал в статье «О красоте. Разговор на важную тему» незадолго до своей кончины (статья была опубликована в журнале «Техническая эстетика» в августе 1985 г.):

«Мы, конструкторы самолетов, знаем, что красота в технике – это категория реальная. В авиации особенно заметна взаимосвязь между техническим совершенством и красотой. Еще на заре авиации конструктор самолетов капитан Фербер говорил: «Красивый самолет летает хорошо, а некрасивый – плохо». <...> Опытный конструктор практически безошибочно судит о самолете по тому, «смотрится» он или «не смотрится». А чем же определяется та-

кая оценка? Целесообразностью – высшей красотой в технике. <...>

Это видение техники не «от бога», а результат огромного опыта. <...> Опытный конструктор может нарисовать профиль крыла одним движением руки. Если потом сделать модель, продуть ее в аэродинамической трубе, можно убедиться, что профиль добротный. Это профессиональный навык. Конструктору нужно иметь верный глаз и твердую руку. В этом ему помогает умение рисовать, что дается постоянным упражнением.

Сам я полюбил рисование с детства. Началось с того, что мне подарили коробку цветных карандашей, еще «фаберовских»³. Помню, первое, что я нарисовал, был красивый солнечный закат. Когда приезжал к нам мой крестный, художник, я мог часами наблюдать, как он грунтовал холст яичным желтком, а потом по нему писал масляными красками. Какое восхищение вызвала его работа, когда на полотне из разрозненных цветowych пятен возникал вдруг пейзаж, портрет или натюрморт. Занятие рисованием, даже в какой-то мере живописью, неотделимо от моей профессии. В КБ я работаю не иначе, как с карандашом в руке» [5, с. 18, 19].

На всю жизнь О. К. Антонов запомнил и такой эпизод из своего детства. Летом 1919 г. он вместе с друзьями нередко бывал на травяном аэродроме вблизи Саратова (об этом еще будет сказано ниже) и стал свидетелем проводов летчика в полет на старом, изношенном самолете «Фарман-30»:

«Вместо бензина самолет был заправлен смесью разных горючих. Выдавший виды мотор «Сальмон», давно уже не дававший полагавшихся ему 160 лошадиных сил, долго чихал и не заводился. Наконец после нескольких хлопков он затрясся, загудел, самолет покатился по траве, подпрыгивая на кочках, тяжело оторвался и, медленно набирая высоту, развернулся на юго-запад. Самолет уходит все дальше и дальше, а товарищи, сняв пилотки, стоят недвижимо и все смотрят ему вслед. Вот он уже еле виден. Только маленькая точка над широкой степью. А товарищи все не расходятся. Выдержит ли самолет? Не сдаст ли мотор? Долетит ли?»

Мы возвращались домой молча. В нас зреет желание строить надежные, быстрокрылые самолеты. И мы с друзьями – Колей и Мишей – принимаемся за новую модель» [3, с. 7, 8].

Школьная эпопея

В Саратове Олег Антонов начинал учиться в Первом Александро-Мариинском реальном

¹ Книги Константина Евгеньевича Вейгелина (1882–1943) по авиационной тематике многократно издавались в России и СССР, начиная с 1911 г. Они содержали много научной, технической, исторической и биографической информации, отличались «заманчивыми» заголовками: «Азбука воздухоплавания: Краткий начальный курс прежних и современных способов летания» (1911), «Перелёт С.-Петербург – Москва» (1911), «Завоевание воздушного океана: история и современное состояние воздухоплавания» (1912), «Современные аэропланы и дирижабли» (1923), «Занимательная авиация» (1928), «Путь лётчика Нестерова» (1939), «Отец русской авиации – Н. Е. Жуковский» (1942) и др.

² Радунская И. Л. Кванты и музы. М.: Советская Россия, 1980. Гл. 5.

³ Faber-Castell – существующая с 1761 г. немецкая компания по производству карандашей, товаров для художников.



училище на улице М. Сергиевская (угол Александровской)⁴. В одном из архивных дел училища в документе за сентябрь 1917 г. можно, действительно, найти фамилию учащегося О. Антонова⁵. Именно в реальном училище он хорошо освоил французский язык, что выручало его в дальнейшей жизни. Но осенью 1918 г. место учебы О. Антонову пришлось поменять. Декретом ВЦИК от 16 октября 1918 г. «О Единой Трудовой Школе Российской Социалистической Федеративной Советской Республики (Положение)» (Sic!) было упразднено деление учебных заведений на различные типы (низшие и средние школы, училища, гимназии и реальные училища). Вместо них вводились Единые трудовые школы (ЕТШ) двух ступеней: 1-я для детей от 8-ми до 13-ти лет



Олег Антонов в 12-летнем возрасте (1918)⁶

Oleg Antonov at the age of 12 (1918)

(5-летний курс) и 2-я – от 13-ти до 17-ти лет (4-летний курс). Некоторые школы вместо «единой трудовой» могли именоваться «советскими». Так, на месте Александро-Мариинского реального училища появилась 3-я советская школа 2-й ступени, для зачисления в которую Олег Антонов формально не дотягивал по возрасту.

Новая школа, в которую сумел «пристроиться» Олег Антонов, находилась недалеко от прежней и располагалась на той же улице (М. Сергиевской, вблизи Никольской), в доме саратовского предпринимателя и мецената Г. В. Очкина. Здесь ранее, в 1877–1890 гг., располагалось и Александро-Мариинское реальное училище (современный адрес – ул. Мичурина И. В., 89). А в 1918 г. в здании была открыта 11-я Единая трудовая советская школа взрослых⁷. Ее начала посещать Ирина, старшая сестра, а Олег стал ходить в школу вместе с ней. «Недостаток» возраста здесь ему в конце концов «простили», и в 1922 г. он получил свидетельство об окончании школы.

Кружок любителей авиации

Чем же интересовался ученик ЕТШ? Главным его увлечением была авиация – ее история, конструкторы, модели самолетов, авиаторы и их подвиги. Вот строки воспоминаний О. К. Антонова о дружбе в 1919 г. с «красными летчиками» на аэродроме в районе Соколовой горы:

«Я и мои друзья, двенадцати – тринадцатилетние ребята, пробирались на аэродром и с замиранием сердца разглядывали удивительные машины. Скоро мы познакомились с летчиками и механиками и собрали рядом на свалке много частей самолетов и их деталей.

Мы строили небольшие модели самолетов «собственной конструкции», выпускали даже рукописный журнал.

Летчики между боевыми вылетами рассматривали «журнал», давали советы, поддерживали в нас желание, когда станем взрослыми, работать над

⁴Первое Александро-Мариинское реальное училище в ранге шестиклассного училища было учреждено в Саратове в 1873 г., но поначалу не имело своего здания. В специально построенном для училища здании (по ул. М. Сергиевская, 105) оно стало располагаться с 1890 г. Впоследствии это здание занимали: с 1918 г. – 3-я советская школа II ступени, в 1931–1932 гг. – 16-я фабрично-заводская школа-семилетка (ФЗС) под эгидой Саратовской ГРЭС, с 1933 г. – 16-я фабрично-заводская школа-десятилетка (ФЗД). С 16 сентября 1941 г. по 4 июня 1946 г. в помещении учебного заведения располагался эвакуационный госпиталь 3931. С сентября 1948 г. здесь начала работать средняя (первоначально – мужская) школа № 19. С 1990 г. – Саратовская гимназия № 1. Современный адрес здания – ул. Мичурина И. В., 88.

⁵ГАСО Ф. 377. Оп. 1. Д. 990. Л. 11 об.

⁶Фото из книги В. Д. Захарченко «Антонов» (М.: Молодая гвардия, 1996. 302 с. 16 л. ил. – (Жизнь замечательных людей. Серия биографий. Основана в 1933 году М. Горьким; Вып. 730).

⁷Впоследствии ее сменила средняя школа № 29, а в 1943 г. здесь была организована мужская средняя школа № 19. Как отмечал видный саратовский краевед В. Н. Семенов, «по признаку своего топографического нахождения в пределах города упомянутые учебные заведения образовали преемственный ряд, который прослеживается до 1990 г., а потом дополняется новым просветительским учреждением – гимназией № 1». См.: Семенов В. Н. Форпост Саратовского просвещения. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2002. С. 100.



укреплением советской авиации, строить, создавать» [3, с. 7].

Именно так: ходили в гости к военлетам не празднующие и даже не просто любознательные мальчишки, а члены Клуба любителей авиации! Его организовал Олег Антонов. Его увлечение проявлялось также в целенаправленном собирательстве всего, что относилось к авиации, – книг, брошюр, фотографий, вырезок из различных журналов и газет. На этой основе он делал рукописный журнал «Кружок любителей авиации» («КЛА»). В своем рассказе «Десять раз сначала», давшем название книге [3], О. К. Антонов писал:

«Все нужные сведения приходилось собирать по крохам. В книжных развалах на Верхнем базаре искали старые книги по авиации, иллюстрированные журналы, содержащие хотя бы одну фотографию или рисунок самолета. Попадались издания 1908, 1911 годов, и в лучшем случае, 1915–1916 годов. Начавший выходить в 1920 году первый советский журнал «Вестник воздушного флота» был для нас откровением» [3, с. 159].

Олег Константинович признавался, что «это собрание сослужило хорошую службу, приучив рассматривать летательные аппараты под углом их развития» [4, с. 14], а также, добавим, способствовало формированию у Антонова энциклопедических знаний по истории авиастроения, давало возможность замечать и исправлять исторические ошибки в публикациях других авторов. «Много раз, – писал он, – я переезжал из города в город, теряя порой всё, но коллекция переезжала со мной и пополнялась из года в год» [3, с. 130]. Исторические познания и находки конструктора в области авиации восхищали, а иногда в буквальном смысле становились сюрпризом для окружающих. Так,

на триумфальном для О. К. Антонова XXVI Международном парижском авиасалоне в Ле Бурже 1965 г., где фурор вызвал его самолет Ан-22 («Антей»), около исторического стенда, посвященного состязанию воздушных шаров в Париже в 1908 г., Олег Константинович продемонстрировал подлинный (!) билет на это соревнование почти 60-летней давности, в шутку назвав себя «немножко волшебником» [3, с. 130].

Студент Саратовского университета

В 1922 г. 16-летний Олег Антонов поступил на путейский факультет (факультет путей сообщения, путьфак) Саратовского университета. Его заявление о приеме в университет сохранилось в Государственном архиве Саратовской области (ГАСО)⁸. В сентябре он прошел «поверочные испытания» в соответствии с программами Рабфака⁹ по предметам: алгебра, геометрия, тригонометрия, физика, литература, политграмота¹⁰.

Путейский факультет появился в структуре университета в 1921 г. В первое послереволюционное время по всей стране начался поддержанный местными органами образования бум по открытию самостоятельных высших учебных заведений. В Саратове 15 июня 1919 г. было объявлено об открытии Политехнического института Саратовского губернского отдела народного образования¹¹. Торжественный акт по этому случаю состоялся в полдень 16 июня в первом корпусе университета. До 1 августа провели даже «летний семестр».

Университетские профессора физико-математического факультета (а именно они при поддержке преподавателей индустриального техникума [6]¹² были инициаторами создания нового вуза) составили учебные планы для нескольких

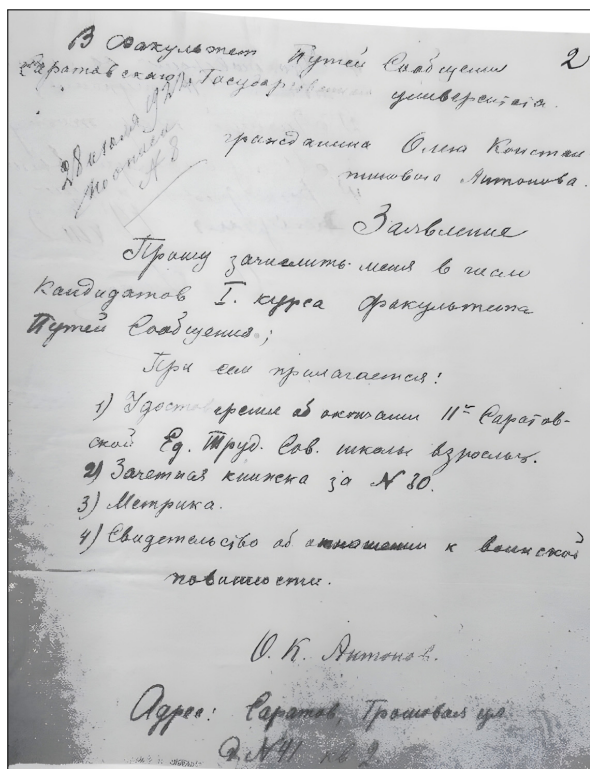
⁸ГАСО. Ф. Р-332. Оп. 5. Д. 189. Л. 2.

⁹Рабочие факультеты (рабфаки) при университетах были введены Постановлением Народного комиссариата просвещения от 11 сентября 1919 г. «с целью подготовки в кратчайший срок рабочих и крестьян в высшую школу», в силу «недостаточной подготовленности пролетарских масс к занятиям в стенах высшей школы, особенно по предметам точного знания (математика, физика, химия и др.)». Процесс поступления в вузы с 1918 г. регулировался не конкурсами, а направлениями и квотами от назначенных организаций, что обеспечивало наполнение вузов представителями названных социальных слоев. С конца 1920-х гг. часть мест отводилась для самостоятельно поступающих, т. е. фактически для наиболее подготовленных абитуриентов. Они сдавали вступительные экзамены. В их числе была и политграмота (политическая грамота), предполагающая знание существовавшей политической терминологии и большевистской истории (роль оценщиков «политграмотности» поступающих могла поручаться «передовым» студентам).

¹⁰ГАСО. Ф. Р-332. Оп. 5. Д. 189. Л. 9.

¹¹ГАСО. Ф. 3190. Оп. 1. Дела постоянного хранения 1919–1921 гг.

¹²До 1919 г. это училище именовалось как Соединенное среднее механико- и химико-техническое училище (открыто в 1889 г. [6]). Обращают на себя внимание переименования училища: политехническое училище (1919 г.), практический институт инженеров (1921 г., с правом выдачи дипломов о высшем образовании), средний политехникум (1923 г.), индустриальный техникум (1924). См.: Семичастнов М. Саратовский Индустриальный Техникум и его значение для Нижнего Поволжья // Нижнее Поволжье. 1927. № 4. С. 126–142. Дополняем данные публикации [6]: М. Ф. Семичастнов, бывший студент факультета права и хозяйства СГУ, заведовал техникумом во второй половине 1920-х годов. Сейчас это колледж радиоэлектронных приборов им. П. Н. Яблочкова в составе СГУ.



Заявление Олега Антонова от 28 июля 1922 г. о приеме в «число кандидатов» первого курса факультета путей сообщения

Oleg Antonov's application dated July 28, 1922 for admission to the "number of candidates" of the first year of the Faculty of Railway Engineering

факультетов политехнического института (механического, электромеханического, химического, геологоразведочного, путей сообщения), распределили учебные дисциплины по преподавателям. Занятия для зачисленных в политехнический институт (а их было около 900 человек!) велись в первом и третьем корпусах университета, а также в индустриальном техникуме в вечернее время. Ректором политехнического института вуза стал опытный инженер-электротехник, выпускник Петербургского технологического института, гласный Саратовской городской думы в 1905–1908 гг. Александр Александрович Лаговский (1871–1949).

Именно он стоял у истоков электрификации Саратова, в том числе пуска в городе трамваев, а также занимался преобразованием его водопроводной и канализационной систем, что способствовало получению Саратовом статуса одного из передовых (в коммунальном отношении) российских городов начала XX столетия.

Идея А. А. Лаговского, который работу в Саратовском городском управлении (после революции – в губернском коммунальном отделе) совмещал с преподаванием, заключалась в преобразовании политехнического училища в высшее техническое учебное заведение. Однако уже 1 октября 1921 г. Народный комиссариат просвещения принял окончательное решение о закрытии политехнического института в Саратове¹³. При этом путевый факультет передавался в состав Саратовского университета и на него объявлялся прием.

Одновременно в 1922 г. в университете проходили другие структурные преобразования, в результате которых был расформирован физико-математический факультет, а открыт факультет педагогический [7, 8]. В то время путевый факультет СГУ оказался единственным факультетом, название которого явно отражало физико-технический профиль подготовки. Видимо, поэтому Олег Антонов и стал студентом именно этого факультета (в архиве СГУ хранится список студентов «путевщиков» в несколько сотен человек). Двумя годами ранее, в 1920 г., на отделение водных путей сообщения путевого факультета поступил друг О. Антонова по реальному училищу Иван Ман, в будущем – легендарная личность, один из героических советских капитанов дальнего плавания, обеспечивший, в частности, успех первых антарктических экспедиций в середине 1950-х гг.¹⁴

Учеба О. Антонова и И. Мана в 1921–1922 гг. пришлось на пик голода в Поволжье¹⁵. Сведений о том, что в течение учебы как в выпускном классе ЕТШ, так и на первом курсе университета, О. Антонов получал какой-либо продуктовый паёк, в архивах не обнаружено. Более того,

¹³ГАСО. Ф. Р-3190. Оп. 1. Д. 152. Л. 1.

¹⁴Поступив в реальное училище (и после революции закончив 3-ю советскую школу 2-й ступени), Иван Ман «одновременно обучался игре на фортепьяно, увлекался спортом – зимой бегал на лыжах, а летом плавал на яхтах; стал членом саратовского яхт-клуба». О жизни Ивана Александровича Мана (1903–1982) см.: Ман Л. И. Жизнь и плавания капитана Мана // Природа. 2003. № 12. С. 59–70. Согласно воле И. А. Мана он похоронен на одном из антарктических островов.

¹⁵Голод в Поволжье начала 1920-х гг. был вызван страшной засухой, повлекшей неурожай, и усугубившей ситуацию большевистской политикой «продразверстки» – насильственного изъятия зерна у крестьян. В Саратовской губернии из 2,7 млн. жителей осенью 1921 г. голодало до 31% населения, зимой 1922 г. – более 50%, весной – летом 1922 г. – до 70%. По отдельным районам (Новоузенский уезд и Автономная область немцев Поволжья) число голодающих доходило до 90–99% населения (см.: Бондареко Т. Ю. Фритьоф Нансен: миссия в России. М.: Paulsen, 2022. 231 с.) Официальное признание существования голода, охватившего 25 миллионов человек, было сделано 26 июня 1921 г. в газете «Правда». В июле была разрешена деятельность (под почетным председательством писателя В. Г. Короленко) беспартийного Всероссийского комитета помощи голодающим,



обучение в университете для О. Антонова было платным. В ГАСО, в фонде Саратовского университета, есть данные о том, что, начав своё студенчество с октября 1922 года, он исправно вносил плату за обучение – вплоть до июня 1923-го¹⁶. В январе 1983 г. в своем письме в Саратов [2] О. К. Антонов вспоминает своих друзей, которые в голодное время работали в распределительном пункте продуктов (Крытый рынок) Американской администрации помощи (сокращенно – АРА; англ.: American Relief Administration, ARA)¹⁷. А вот И. Ман в 1921 г. в связи с невероятно сложными жизненными обстоятельствами прервал учебу и уехал в Ртищево, где 5 месяцев работал помощником уполномоченного распределительной базы, а затем заведующим складом Международного союза помощи детям, функционировавшего под эгидой Фритьофа Нансена¹⁸.

В 1923 г. О. Антонов и И. Ман вынуждены были оставить обучение в СГУ, поскольку с 1 июля 1923 г. Циркуляром Народного комиссариата просвещения факультет путей сообщения был закрыт¹⁹. Студенты распределялись по другим вузам и факультетам. Таким образом, О. Антонов

проучился в Саратовском университете лишь первый курс (И. Ман – два курса), накопив за это время первый запас своих знаний по высшей математике и физике. В числе преподавателей были профессора В. В. Голубев, Г. Н. Свешников, И. Ф. Полак, К. А. Леонтьев, доцент Г. П. Боев [9–12].

Студентам путейского факультета полагались бесплатные железнодорожные билеты. Получив такие бумаги, студенты разъехались по разным городам (И. Ман уехал в Петроград и поступил в Морской техникум). Но Олег Антонов в 1923–1925 гг. взял двухлетнюю паузу в учебе и всецело отдался своему любимому увлечению – конструированию и пропаганде планеров. И только в 1925 г. он поступил в Ленинградский политехнический институт.

«Планер – ступень, ведущая в небо»

Слет планеристов в Коктебеле 1924 г.

В книге «Десять раз сначала» О. К. Антонов вспоминал:

«Организация в 1923 году Общества друзей воздушного флота²⁰ была большим событием в жизни

который, правда, вскоре был ошельмован и «вытеснен» правительственной Центральной комиссией помощи голодающим при ВЦИК. Необыкновенно действенным оказалось обращение писателя Максима Горького «Ко всем честным людям», опубликованное в конце июля 1921 г. за рубежом. Международные гуманитарные организации развернули ширококомасштабные акции помощи голодающим в Поволжье.

¹⁶ ГАСО Ф. Р-332. Оп.1. Д. 240. Л. 21–21 об.

¹⁷ Неправительственная организация АРА была создана в США для оказания продовольственной помощи европейским странам, пострадавшим в Первой мировой войне. Возглавлялась будущим президентом США Г. Гувером и просуществовала в 1919–1923 гг. Как АРА, так и другие зарубежные гуманитарные миссии, включая миссию Ф. Нансена, работали на основе договора с правительством РСФСР. Главным условием работы АРА было: Советское правительство предоставляет АРА свободу по организации помощи так, как она считает нужным (это вызывало крайнее неудовольствие властей), а АРА обязуется кормить население, оставаясь вне политики. АРА доставляла грузы из Америки в российские порты, распространяла продовольствие, оказывала медицинскую помощь. Советские власти брали на себя расходы, связанные с внутренней транспортировкой, складированием, помещениями для АРА, связь, оплату местному персоналу. АРА имела право самостоятельно подбирать необходимый служебный персонал из местного населения (численность зарубежных сотрудников в стране была от 200 до 300 чел., местного персонала – в 1000 раз больше). В течение двух лет АРА кормила около 10 миллионов человек. Зарубежная помощь прервалась в 1923 г., когда РСФСР начала экспортировать зерно. Объективно помощь АРА стала возможной потому, что за годы Первой мировой войны в США скопилось огромное количество продовольствия, которое могло дестабилизировать внутренний рынок и разорить фермеров. Помощь АРА в течение последующих нескольких десятилетий принижалась, её обвиняли в контрреволюционной деятельности, вывозе ценных предметов из страны.

Представителем правительства РСФСР при всех заграничных организациях помощи голодающим в Саратовской губернии был Сергей Александрович Бирман (1890–1947). Координационный центр помощи голодающим находился в доме по ул. Грошова, 8.

¹⁸ ГАСО. Ф. 332. Оп. 5. Д. 189. Д. 3808. Л. 5. Люция Ивановна Ман (1935–2005) писала про отца: «Времена были голодные. Приходилось подрабатывать рабочим на складе, куда поступала помощь голодающим Поволжья. В конце дня рабочим разрешалось подметать склад и собирать остатки просыпавшейся муки, сахара, какао. В 1921 г. в Саратов приезжал Фритьоф Нансен, знаменитый полярный исследователь, гуманист и друг России, руководитель Фонда помощи голодающим Поволжья. К тому времени море и полярные исследования уже завладели всеми помыслами отца, а мимолетная встреча с Нансеном только укрепила его уверенность в том, что ему пора «двигаться к настоящему морю»» (Природа, 2002. № 12. С. 61).

¹⁹ ГАСО. Ф. Р-332. Оп.1. Д. 255. Л.49 об.

²⁰ Ответственным секретарем Саратовского губернского отделения ОДВФ был Юрий Алексеевич Голубев. Полагают, что именно в честь него Олег Антонов назвал свой первый планер «Голубем». Создание Общества друзей воздушного флота в марте 1923 г. стало кульминацией начавшейся в 1921 г. пропагандистской кампании по сбору финансовых средств для авиации. Это было главной целью Общества. Кроме того, важным считалось привлечение молодежи к занятиям авиамоделированием, планеризмом и авиационными видами спорта, подготовка летных кадров. На объединенном заседании руководства ОДВФ



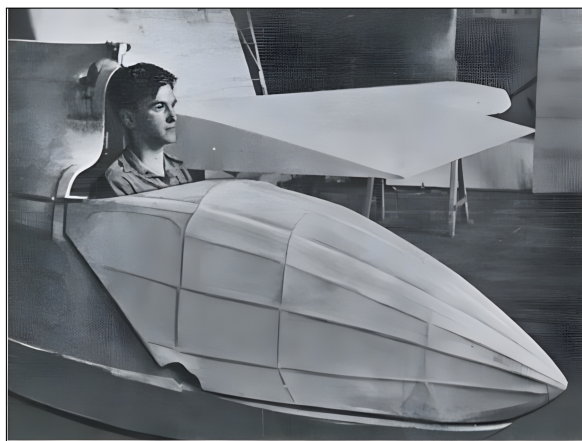
Советской страны. Для молодежи, бредящей авиацией, оно открыло двери в небо. Летом того же года при губернском отделе ОДВФ были организованы спортсекция и кружок планеристов. Не имея никакого опыта, группа молодых ребят все же была уверена, что сможет построить планер сама. Да и кто тогда мог помочь? В Саратове никакой авиационной промышленности и никаких авиаспециалистов не было. <...> Начавший выходить в 1920 году первый журнал «Вестник Воздушного флота» был для нас откровением. <...> С постройкой дело было проще. Почти все ребята были рабочими, знали два-три ремесла. Занятия моделизмом еще крепче подружили нас с рубанком, дрелью, напильником и кистью, с тонкой работой, привили аккуратность, чувство материала, глазомер. Дело кипело.

Постепенно, по мере того как вырисовывались отдельные части планера: ажурные лонжероны крыльев, каркас фюзеляжа, оперения, – в мастерской стали появляться все новые ребята, неведомым каким образом пронюхавшие, что строится что-то интересное, что должно полететь.

В 1924 г. наш планёр «Голубь» побывал на слете в Коктебеле, а на следующий год я уехал учиться [в Ленинград]» [3, с. 138, 139].

Строили планер ребята в помещении Саратовского индустриального техникума летом 1924 г. (именно на его базе проводилась часть занятий путейского факультета). Подробный рассказ о слете планеристов в Коктебеле опубликовала газета «Саратовские известия» 23 октября 1924 г. Завершалась заметка словами:

«Т.т. Антонов и Броварский в дальнейшем считают своей задачей внедрение в широкие слои трудящейся молодежи идеи планеризма, для чего будут в первую очередь организованы кружки планеристов, а затем будет приступлено к постройке планеров».



Олег Антонов в кабине планера «Голубь» (ОКА-1), 1924 г. [5, с. 18]

Oleg Antonov in the cockpit of the glider "Golub" (OKA-1), 1924 [5, p. 18]

Позднее эпопею с участием в планерных испытаниях в Коктебеле О. А. Антонов подробно описал в книге «Десять раз сначала» [3, с. 8–14].

Саратовцы на II всесоюзных планерных испытаниях. (Из беседы с участниками т. Антоновым и т. Броварским.)

Заголовок материала в газете «Саратовские известия» от 23 октября 1924 г. (с. 5), подписанного инициалами МИГ, о планерных испытаниях 1924 г. в Коктебеле

Headline of the article in the newspaper "Saratovskie Izvestia" from October 23, 1924 (p. 5), signed with the initials MIG, about the glider tests of 1924 in Koktebel

и делегатов XII съезда РКП(б) 26 апреля 1923 г. программными задачами Общества были провозглашены «постройка новых самолетов на средства, жертвуемые населением, оказание помощи созданию авиапромышленности, оборудование земной поверхности, помощь в подготовке кадров – авиаинженеров, летчиков, механиков, мотористов», а также активная пропаганда авиации при проведении различных акций и в печати. Вопросы организации ОДВФ стали предметом обсуждения на Первом Всесоюзном совещании ОДВФ в сентябре 1923 г. С ноября 1923 г. стал издаваться печатный орган ОДВФ – авиационно-воздухоплавательный журнал «Самолет». «Другом воздушного флота» мог стать любой, купив акции «Добролета» – первой акционерной авиакомпания (создана в 1923 г.), нагрудные значки с аббревиатурой ОДВФ, благотворительные марки, которые можно было клеить на письма и открытки без зачета их номинала в стоимость пересылки.

В губерниях были созданы отделения ОДВФ, привлекавшие молодежь к построению планеров и проведением соревнований по планеризму. В газете «Саратовские известия» от 5 и 12 мая 1925 г. опубликованы отчеты о деятельности Саратовского губернского отделения ОДВФ за 2 года: «Нас уже 15 тысяч. За нами 2 года строительства воздушного флота. Мы выдвинули в Ленинскую эскадрилью наш аэроплан «Саратовец». На 14 июля (праздник Красной авиации) намечено устройство саратовским ОДВФ состязаний летающих моделей <...> кружков уездов Саратовской губернии. К участию на III Всесоюзном и I Поволжском состязаниях планеров строятся планеры саратовскими кружками «Парящий полет» и «Икар». В маршрут агитполета аэроплана включены Саратов и Вольск».

В 1925 г. ОДВФ и Общество друзей химической обороны и химической промышленности Доброхим были объединены в общество «Авиахим». А в 1927 г. Авиахим и Общество содействия обороне СССР объединились в «Осоавиахим» – общество содействия обороне, авиационному и химическому строительству.

Для него это было огромное стимулирующее событие, ознаменовавшееся, в том числе, знакомством с выдающимися людьми – летчиком-испытателем К. К. Арцеуловым, конструкторами С. В. Ильюшиным и С. П. Королевым.

Участие в конкурсе журнала «Смена». Непосредственно перед смотром планеров в Коктебеле, в мае 1924 г., О. Антонов был признан победителем журнала «Смена» и московского кружка планеристов «Парящий полет» на лучший проект планера. Для него стала сюрпризом обложка майского журнала (1924, № 8): он увидел на ней проект своего планера «Голубь», выполненный им в красках. Проект был признан технически грамотным, в журнале были воспроизведены чертежи Антонова и дано описание (сделанное редакцией) инструкции-алгоритма «Как самим построить планер (Организация и задачи планерных кружков)».

Зачем нужны планеры? Удивительным кажется и то, что в том же 1924 г. 18-летний паренек издает две брошюры по линии Саратовского губернского отдела ОДВФ. В одной из них демонстрируется «механизм» изготовления простых бумажных моделей планеров²¹, а во второй обсуждается практически важный вопрос «Зачем нам нужны планеры?»²². На обложке брошюр



Обложка журнала «Смена» 1924 г. с изображением планера О. Антонова

Cover of the magazine "Smena" 1924 with the image of O. Antonov's glider

указаны регалии автора – ответственный секретарь спортсекции Саргуботдела ОДВФ, орга-



Материалы о конструировании планеров на базе чертежей О. Антонова (журнал «Смена», 1924, № 8)

Materials on the design of gliders based on O. Antonov's drawings (magazine «Smena», 1924, No. 8)

²¹ Антонов О. К. Простейшие модели планеров из бумаги / отв. секр. спортсекции Саргуботд. ОДВФ. и конструктор планера "Голубь" О. К. Антонов. Саратов : Сарат. губ. отд. О-ва друзей возд. флота, 1924. 11 с.: ил.

²² Антонов О. К. Зачем нам нужны планеры? / отв. секр. спортсекции Саргуботд. О. Д. В. Ф., организатор 1-го кружка планеристов О. К. Антонов. 2-е изд., испр. и доп. Саратов : Сарат. губ. отд. О-ва друзей возд. флота, 1925. 18 с.: ил.



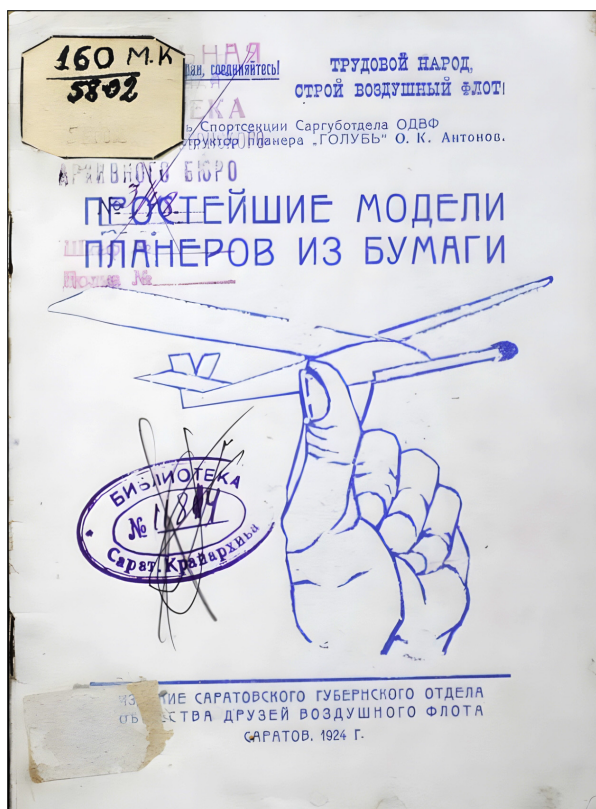
низатор 1-го кружка планеристов, конструктор планера «Голубь» О. К. Антонов.

В брошюре «Зачем нам нужны планеры» автор провозглашает: «Планер – ступень, ведущая в небо», а приводимые автором доводы несут, пожалуй, универсальный (касающиеся любых типов летательных аппаратов), прогностический характер – как для мирной области использования, так и для военной²³.

В 1924 г. он публикует заметку «Планер системы О. К. Антонова» в журнале ОДВФ «Самолет», а в 1925 г. – материалы «Стройте модели» и «Новые формы планеров из бумаги» в журнале ОДВФ Северо-Западной области.

Разработка новых моделей планеров. Летом 1927 г. О. Антонов, будучи уже студентом Ленинградского политехнического инсти-

тута, руководил испытаниями своего планера ОКА-2 на 200-метровой возвышенности в северо-восточной части окрестностей г. Саратова, для которой существуют схожие наименования – Жарин Бугор (сейчас оно – официальное, присутствует на картах) и Жареный Бугор («простонародное», употреблявшееся в прессе в 1920-е гг.). В книге «Десять раз сначала» Антонов рассказывает об этих испытаниях с определенной долей профессионального юмора (раздел книги называется «Первое знакомство с пограничным слоем») и даже приводит математические расчеты, доказывающие, что подъемная сила в тот момент (230 кг) была больше, «чем весил планёр (102 кг) и пилот в трусах и тапочках (64 кг)», т. е. планёр должен был прекрасно летать, а он это делать не хотел. Антонов пишет:



Брошюры О. К. Антонова, выпущенные в Саратове в 1924 г. (Фонд научно-справочной библиотеки Государственного архива Саратовской области)

Brochures by O. K. Antonov, published in Saratov in 1924 (Fund of the scientific reference library of the Saratov Region State Archives)

²³«Самолет для всех внесет в жизнь новый элемент, он сделает жизнь удобной, легкой и культурной. Он оздоровит крестьянское хозяйство и облегчит работу землемеров, делая с помощью воздушной фотографии в несколько минут идеально точные и наглядные планы близлежащей местности» [1, с. 21].

«...Тот, кто имеет господство в воздухе, в современно войне имеет колоссальные преимущества перед врагом: он может беспрепятственно производить разведку расположения войск противника, его передвижения, бомбить окопы, склады, ангара, направлять огонь своей артиллерии по неприятелю и много других преимуществ» [1, с. 20].

«В середине жаркого лета при температуре 30 градусов на «Жареном Бугре» под Саратовом на высоте 180 метров над уровнем моря <...> мы испытывали планёр. Должен ли очень легкий учебный планёр с нагрузкой всего 8,5 килограмма на квадратный метр взлететь, если шесть молодых, здоровых саратовских ребят тянут его на верёвке под горку, против ветра силой 5–6 метров в секунду? Разумеется, должен! <...> Но он не взлетал... Это противоречило даже тому маленькому опыту, который был у меня, видевшего полеты на Вторых всесоюзных планёрных испытаниях. Мы выждали еще более

От модели через опыт к самолету

На всесоюзные состязания летающих моделей.

В результате состязаний, устроенных спортивной Саратопской «Авиахимия» и посмертно и во вторник, на отрывавшихся в Москве всесоюзных состязаниях летающих моделей Саратов будет представлен двумя моделями монопланного типа и моделью планера. На состязаниях слуг конструктора моделей комсомолец Вальев (член кружка пм. бр. Байт) и пионер Урлапов (чл. кр. «Парящий полет»). Кроме того, один из первых в Саратове планеристов конструктор Антонов также берет в Москву модель планера.

Нужно надеяться, что первое всесоюзное состязание даст сильный толчок развитию модельного спорта.

Усилить воспитательную работу.

Во время дополнительных состязаний моделей во вторник произошел случай, который указывает на настоятельную необходимость углубления и расширения пропаганды значения авиамодельного спорта в Саратове.

К началу состязаний за Соколовой горой собралось свыше двухсот зрителей, большей частью из районов, прилегающих к горе. Среди молодежи, которая сильно интересуется модельным спортом, к сожалению нашлась группа хулиганов, которые сильно мешали ходу состязаний. Дело дошло даже до того, что эта группа стала кидать камни в модели и в результате несколько моделей сломаны и исковерканы. Между тем, в конструировании каждой модели каждым моделистом вложено не мало любовного труда и изобретательности.

Заметка из газеты «Саратовские известия»
от 27 августа 1926 г., с. 3

Note from the newspaper "Saratovskie Izvestia"
dated August 27, 1926, p. 3

Планерный спорт

Первые полеты.

Недавно в Саратове были устроены пробные испытания планеристов. Испытания происходили в 10 верстах от Саратова, на так называемом «Жареном бугре». В полетах принимали участие все «старые» моделисты, немало поработавшие в области конструирования летающих моделей и теоретического планирования. Впервые они же попробовали свои силы в полетах на планере, построенном собственными силами в мастерской ОСО-Авиахимия, по чертежам саратовского конструктора тов. О. Антонова—ОК 2.

Первые по существу испытания нужно считать вполне удавшимися. Попытки происходили два дня. В первый день модель-планерист т. Васильев поднялся на высоту в 13 метров и пролетел 140 метров. На следующий день планер был отрегулирован и т. т. Видишев, Васильев Урланов и Урадов совершили каждый по 4 влета. Т. Видишев в этот день пролетел 170 м., продержавшись в воздухе 26-27 с., и сделал прекрасную посадку. Всего таким образом в этот день было сделано 16 влетов.

После испытаний эти четверо товарищей начали подготовку к сдаче экзамена на звание пилотов-планеристов.

В дальнейшем нужно создать благоприятные условия для развития модельно-планерного спорта в Саратове. Губсовет ОСО-Авиахимия со своей стороны отпускает на это дело около 2000 рублей на летнюю работу. Из этих денег около половины пойдет на модельный спорт, а остальные на постройку двух планеров.

Заметка из газеты «Саратовские известия»
от 22 мая 1928 г., с. 4

Note from the newspaper "Saratovskie Izvestia"
dated May 22, 1928, p. 4

сильного северо-западного ветра. Под его ударами ковыль ходил волнами и кузнечики пулями пролетали мимо наших носов.

Еще одна попытка. Ребята бегут, как будто от этого зависит спасение их жизни. Сверкают подошвы, до блеска натёртые сухой травой. Планёр быстро катится на своих деревянных колёсах, сделанных из кругов венских стульев. Я стремлюсь облегчить разбег, давая ручку от себя, потом резко беру полностью на себя. Планёр вяло отделяется от земли и, пропланировав десяток метров, тяжело плюхается, со скрипом и стуком прыгая по щербатому склону «Жареного Бугра». Обессиленные, мы возвращаемся к палатке. Ни разговоров, ни смеха. Мне, как конструктору планёра, и досадно, и стыдно. Но ведь планёр построен правильно! Он должен летать! В чем же дело?» [3, с. 14–16].



К началу занятий О. Антонов уезжает в Ленинград с тягостным ощущением, как он выразился, не состоявшегося по его вине события. А загадка разрешилась весной будущего года. Еще до возвращения Антонова ребята вновь вытащили планёр на Жарин Бугор, но перед полетами пористый материал мадаполам, которым был обтянут планёр, «они покрыли раствором крахмала, не обращая внимания на то, что в прошлом году они бросили эту затею, так как плотно от этого провисло между нервюрами, будто кожа на рёбрах худой лошади» [3, с. 16].



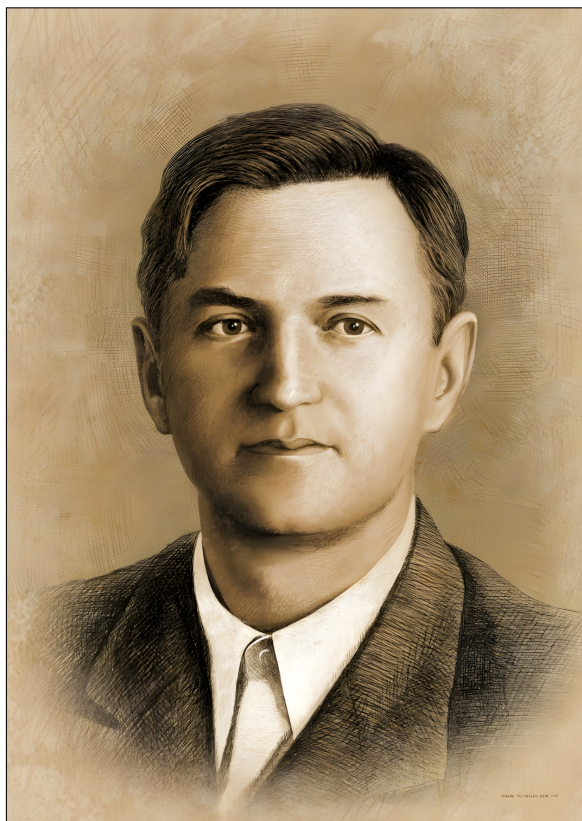
Олег Антонов на испытании своего планера «ОКА-2», 1927 г. [3]

Oleg Antonov testing his OKA-2 glider, 1927 [3]

Каково же было удивление всех, когда с первых же метров планёр легко отделился от земли, набрал два-три десятка метров высоты и пошел, и пошёл планировать в долину! И все благодаря крахмалу, который закупорил поры легкой редкой ткани, уменьшив толщину пограничного слоя воздуха вокруг крыльев, что обусловило увеличение подъемной силы. Победная реляция с подробностями была опубликована в газете «Саратовские известия» 22 мая 1928 г.!

Фамилия Антонова не раз встречается в материалах саратовской прессы второй половины 1920-х гг., посвященных планеризму, ОДВФ и образованных на его основе обществам Авиахиму и Осоавиахиму. В соревнованиях по авиа-моделированию и планерному спорту на планерах участвовали многие участники его кружка конструктора (так он уже в те годы стал именоваться) О. Антонова.

В Ленинграде в годы учебы в Политехническом институте Антонов продолжал заниматься конструированием планеров, а после окончания института в 1930 г. получил направление в Москву для налаживания их серийного производства.



Выпускник авиастроительного факультета Ленинградского политехнического института 1930 г. Олег Константинович Антонов. Портрет любезно предоставлен Музеем истории Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (2024)

Graduate of the aircraft construction department of the Leningrad Polytechnic Institute in 1930 Oleg K. Antonov. Portrait courtesy of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University History Museum (2024)

Заключение

Дальнейшая жизненная траектория О. К. Антонова как конструктора планеров и самолетов пролегла через Москву, Новосибирск, Киев. В Москве он стал главным конструктором планерного завода Осоавиахима, выпустившего сериями около 30 типов безмоторных аппаратов для аэроклубов страны. Он всегда ратовал за массовые занятия планерным спортом. В конце 1930-х гг. его беспокоило, что Осоавиахим перестал поддерживать массовое движение любителей воздухоплавания, что выражалось в сокращении производства планеров для аэроклубов, предельно жестком отборе (по уровню летной квалификации) участников соревнований, причем на вполне определенных типах планеров (только конструкторов О. Антонова и Г. Грошева). Руководством Осоавиахима это объяснялось



необходимостью снижения числа несчастных случаев и опасных полетных маршрутов²⁴.

Планерный завод был закрыт, и центр тяжести конструкторской деятельности О. К. Антонова сместился в область создания транспортных и универсальных самолетов, где и реализовался его исключительный талант. Транспортные самолеты – это особая «фишка» О. К. Антонова, но на его счету и другие прекрасные типы гражданских и военных самолетов, отличающиеся универсальностью, надежностью, рентабельностью и долговременным использованием²⁵. «Долгожителем»-рекордсменом является созданный в 1940-х гг. оригинальный биплан Ан-2, нашедший широчайшее применение как сельскохозяйственный (знаменитый «кукурузник»), пассажирский (перевоз сотни миллионов пассажиров), спортивный и учебный самолет. Любил Антонов и свою «Пчелку» – самолет Ан-14 (1960), способный взлетать и садиться на самых маленьких площадках. Большую социальную роль

сыграл региональный и межрегиональный (близкие и средние расстояния) пассажирский самолет Ан-24 (1959).

Беспрецедентный вклад О. К. Антонова в развитие отечественной авиации был отмечен Государственными премиями, избранием академиком АН СССР, присвоением звания Героя Социалистического Труда.

Автобиографическая книга О. К. Антонова «Десять раз сначала» представляет его как интересного и остроумного рассказчика. Он обладал художественным талантом, на досуге писал картины маслом. Часть его живописных работ можно увидеть в названной книге. С юных лет любил теннис, студентом играл на площадке Саратовского университета с Николаем Чернышевским, внуком Н. Г. Чернышевского [2].

Книга О. К. Антонова «Для всех и для себя» (М. : Экономика, 1965) и его публицистические статьи характеризуют Олега Константиновича как опытного практика и тонкого знатока



Ю. А. Гагарин и О. К. Антонов, 1966 г. (РГАНТД. Архивный № 1-5920)
Yury A. Gagarin and Oleg K. Antonov, 1966 (RGANTD, Archive No. 1-5920)

²⁴Меры эти поклонники воздушного парения считали недальновидными, поскольку они, на их взгляд, не стимулировали изобретательскую деятельность в области безмоторной авиации (в том числе в части автостарта планеров) и приводили к резкому снижению числа профессионально подготовленных планеристов. Политику Осоавиахима О. К. Антонов в газете «Известия» (№ 113 от 15 мая 1937 г.) охарактеризовал словами «равнодушие и самореклама». Вместе с ним материал подписали еще 26 человек – конструкторы, инженеры, другие работники планерного завода, летчики-испытатели. Среди них обращают на себя внимание прежде всего такие имена: Г. Ф. Грошев, конструктор многоместных планеров; В. С. Пышнов, участник соревнований планеристов в Коктебеле 1923–1924 гг., конструктор, начальник кафедры «Динамика полетов» Военно-воздушной инженерной академии имени Н. Е. Жуковского, будущий доктор технических наук, генерал-лейтенант; Б. В. Раушенбах, участник соревнований в Коктебеле, конструктор, будущий конструктор космической техники, академик АН СССР. Материал за авторством О. К. Антонова включен в [1, с. 204–206].

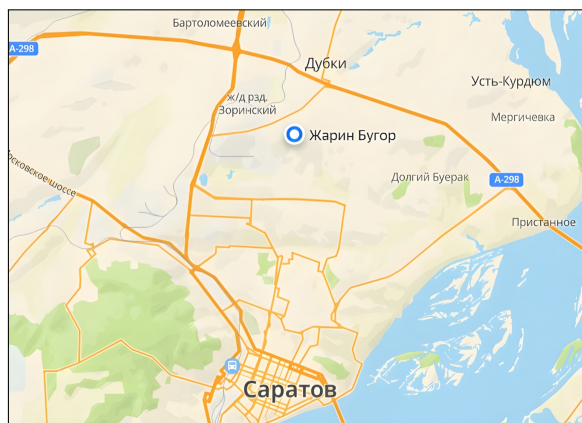
²⁵См.: Якубович Н. В. Неизвестный Антонов. М. : Яуза; Эксмо, 2009. 384 с.



и критика современной ему экономической системы. В этой книге найдутся экономические положения, не утратившие своего значения для современности.

Иногда Олегу Константиновичу удавалось осуществлять и свою давнюю мечту – полетать за штурвалом «своего» самолета. Символично, что биографические линии О. К. Антонова и первого космонавта мира Ю. А. Гагарина имеют пересечение у склона скромного холма под Саратовом. Олег Константинович здесь в 1927 г. впервые осуществил полет на сконструированном им планере, а Юрий Алексеевич в 1955 г. впервые совершил самостоятельный полет на самолете и прыгнул с парашютом в непосредственной близости от Жарина Бугра.

Письма Антонова в Саратов свидетельствуют, что Саратов он не забывал никогда, а под



Жарин Бугор на схеме Гагаринского района г. Саратова, 2024 г.

Zharin Bugor on the map of Saratov Gagarin district, 2024
конец жизни испытывал и острое ностальгическое чувство. Однажды он прислал план памятных для него в Саратове мест [2]²⁶. Адресат



Мемориальной доска на доме по ул. Дзержинского, 39 (установлена согласно решению Саргорисполкома от 31 декабря 1987 г.)

Memorial plaque on the house at 39 Dzerzhinsky Street (installed in accordance with the decision of the Saratov City Executive Committee on December 31, 1987)



Мемориальная доска на здании 1-й гимназии (установлена согласно решению Саргорисполкома от 13 декабря 1985 г.)

Memorial plaque on the building of the 1st Gymnasium (installed in accordance with the decision of the Saratov City Executive Committee dated December 13, 1985)

²⁶ В письме О. К. Антонова от 11–15 января 1983 г. (указано даже время начала письма – 17 ч. 42 мин. 11 января), хранящемся в Саратовском областном музее краеведения, временем проживания семьи Антоновых в доме на Грошовой (Дзержинского) названы 1916–1922 гг. Адресом на Грошовой улице в заявлении на поступление в СГУ Антонов называет дом № 41. Для периода с 1922 по 1925 г. на плане указано местоположение дома Антоновых на ул. Цыганская (ул. Кутякова) между улицами Вольская и Ильинская (Чапаева). А самый первый период жизни Антоновых в Саратове, согласно тому же плану, семья провела



письма О. К. Антонова – Татьяна Викторовна Скворцова. Ее друг детства и юности Олег Антонов, уехав из Саратова, писал ей, Тате, начиная с 1926 г. [2]. В октябре 1988 г. Татьяна Викторовна подарила в Саратовский областной краеведческий музей письма, полученные от О. К. Антонова в 1970–1980 гг.

На доме по ул. Дзержинского (б. Грошовой), где жил О. К. Антонов, и на здании бывшего реального училища, где он учился, установлены памятные доски-«близнецы».

Решением Саратовского горисполкома от 10 марта 1981 г. О. К. Антонову было присвоено звание Почётного гражданина г. Саратова. Спустя четыре года, 12 апреля 1985 г., Второй проезд Строителей в Ленинском районе был переименован в улицу Академика Антонова О. К.

Список литературы

1. Антонов О. К. Планеры. Самолеты / отв. ред. Б. Е. Патон. Киев : Наукова думка, 1990. 504 с.
2. Шашкина М. Н. Олег Константинович Антонов: эпизоды саратовской жизни авиаконструктора // Память о прошлом – 2021. X Самарский историко-архивный форум, посвященный 60-летию полета Ю. А. Гагарина в космос (Самара, 15–20 апреля 2021 г.) : сб. науч. трудов / сост. О. Ю. Козырь, Г. С. Пашковская, О. В. Корбан. Самара : РГА в Самаре, 2021. С. 67–74.
3. Антонов О. К. Десять раз сначала: рассказы. Киев : Веселка, 1981. 165 с.
4. Казаков В. Б. Сотвори себя: Документально-художественная повесть об авиаконструкторе О. К. Антонове; Бесшумный десант: Очерки. Саратов : Приволжское книжное издательство, 1986. 480 с.
5. Антонов О. К. О красоте. Разговор на важную тему // Техническая эстетика. 1985. № 8. С. 18–19.
6. Аникин В. М. Имени П. Н. Яблочкова // Очерки истории физико-математического образования в Саратовском университете. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2023. Вып. 5. С. 58–94.
7. Аникин В. М., Гнеденко Д. Б., Федорова М. А. Саратовские годы братьев Бориса и Глеба Гнеденко // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 68–98. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-1-68-98>, EDN: WIJAUS
8. Аникин В. М., Гнеденко Д. Б., Федорова М. А. Как учились математики и физики на педагогическом факультете СГУ. Судьбы преподавателей и студентов // Очерки истории физико-математического образования в Саратовском университете. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2023. Вып. 5. С. 8–57.

9. Аникин В. М. Профессор, декан, ректор Саратовского университета Владимир Васильевич Голубев. 2. «Двенадцатилетнее пребывание в Саратове сыграло в моей жизни исключительное значение» // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 170–188. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-170-188>
10. Аникин В. М. Профессор астрономии Саратовского университета Иосиф Фёдорович Полак (1881–1954) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 144–159. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-144-159>
11. Голубков П. В. Константин Александрович Леонтьев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 65–68. EDN: RGAWEB
12. Аникин В. М. Профессор Саратовского университета Георгий Петрович Боев (1898–1959) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 306–322. <https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-3-306-322>, EDN: ZZBMAX

References

1. Antonov O. K. *Planery. Samolety* [Paton B. E., ed. Gliders. Aircraft]. Kiev, Naukova Dumka, 1990. 504 p. (in Russian).
2. Shashkina M. N. Oleg Konstantinovich Antonov: Episodes of the Saratov life of an aircraft designer. *Pamyat' o proshlom – 2021. X Samarskii istoriko-arkhivnyi forum, posvyashchennyi 60-letiyu poleta Yu. A. Gagarina v kosmos (Samara, 15–20 aprelya 2021 g.): sb. nauch. trudov. Sost. O. Yu. Kozyr', G. S. Pashkovskaya, O. V. Korban* [Kozyr O. Yu., Pashkovskaya G. S., Korban O. V., comp. Memory of the Past – 2021. X Samara Historical and Archival Forum dedicated to the 60th anniversary of Yuri Gagarin's flight into space (Samara, April 15–20, 2021): Collection of scientific works. Samara, RGA in Samara, 2021, pp. 67–74 (in Russian).
3. Antonov O. K. *Desyat' raz snachala: rasskazy* [Ten Times from the Beginning: Stories]. Kiev, Veselka, 1981. 165 p. (in Russian).
4. Kazakov V. B. *Sotvory sebya: Dokumental'no-khudozhestvennaya povest' o konstruktore O. K. Antonove* [Create yourself: A documentary-fiction story about aircraft designer O. K. Antonov; Silent landing: Essays]. Saratov, Privolzhskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1986. 480 p. (in Russian).
5. Antonov O. K. On beauty. Conversation on an important topic. *Tekhnicheskaya estetika* [Technical Aesthetics], 1985, no. 8, pp. 18–19 (in Russian).
6. Anikin V. M. Named after P. N. Yablochkov. *Ocherki istorii fiziko-matematicheskogo obrazovaniya v Saratovskom universitete* [Anikin V. M., ed. Essays on the

в доме на Вольской вблизи М. Сергиевской (Мичурина), т. е. рядом с Первым Александро-Мариинским реальным училищем. Последние два дома предстоит еще точно идентифицировать.



history of physics and mathematics education at the Saratov University]. Saratov, Saratov State University Publ., 2023, iss. 5, pp. 58–94 (in Russian).

7. Anikin V. M., Gnedenko D. B., Fedorova M. A. Saratov life of brothers Boris and Gleb Gnedenko. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 68–98 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-1-68-98>, EDN: WIJAUS
8. Anikin V. M., Gnedenko D. B., Fedorova M. A. How mathematicians and physicists studied at the pedagogical faculty of Saratov State University. The fate of teachers and students. *Ocherki istorii fiziko-matematicheskogo obrazovaniya v Saratovskom universitete* [Anikin V. M., ed. Essays on the history of physics and mathematics education at the Saratov University]. Saratov, Saratov State University Publ., 2020, iss. 5, pp. 8–57 (in Russian).
9. Anikin V. M. Professor, dean and rector of Saratov University Vladimir V. Golubev. 2. «The twelve-year stay in Saratov played an exceptional meaning in my life». *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 170–188 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-170-188>
10. Anikin V. M. Professor of Astronomy of Saratov State University Joseph Fedorovich Polak (1881–1954). *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 144–159 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-144-159>
11. Golubkov P. V. Konstantin Aleksandrovich Leont'ev // *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2014, vol. 14, iss. 1, pp. 65–68. EDN: RGAWEB
12. Anikin V. M. Professor of Saratov University Georgy P. Boev (1898–1959). *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 306–322 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-3-306-322>, EDN: ZZBMAX

Поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 20.12.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 18.11.2024; approved after reviewing 28.11.2024; accepted for publication 20.12.2024; published 31.03.2025

PERSONALIA

К 70-летию со дня рождения Сергея Аполлоновича Никитова

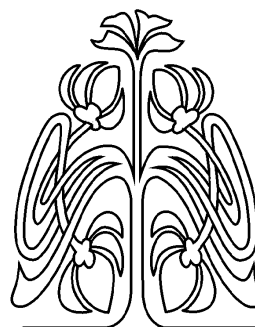


23 апреля 2025 г. исполняется 70 лет известному ученому, активно работающему в области твердотельной микро- и нано-электроники, электроники и физики магнитных явлений, акусто- и магнитоэлектроники, магнитооптики, академику РАН, доктору физико-математических наук, профессору, директору Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН **Сергею Аполлоновичу Никитову**.

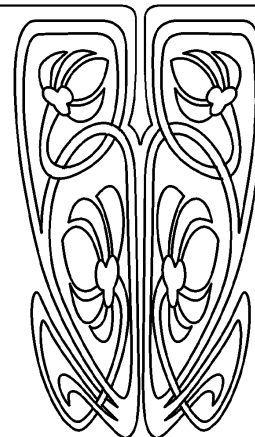
С. А. Никитов родился 23 апреля 1955 года в городе Бердичеве (Житомирская область, Украинская ССР). В 1974 г. окончил факультет физической и квантовой электроники Московского физико-технического института (МФТИ), в 1982 г. – аспирантуру МФТИ. Кандидатскую диссертацию защитил на тему «Магнитоэлектронные волны в периодических структурах».

С 1982 г. С. А. Никитов работает в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) им. В. А. Котельникова Российской академии наук (РАН). К началу 2000-х гг. прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего Лабораторией оптических и магнитных методов обработки информации. С 2003 г. С. А. Никитов – заместитель директора по научной работе ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, а в 2015 году становится его директором.

В 1991 г. Сергей Аполлонович защитил докторскую диссертацию на тему «Нелинейные спиновые и электромагнитные волны в тонкоплёночных магнитных структурах». В 1995 г. ему присвоено ученое звание профессора. В 2003 г. С. А. Никитов избирается членом-корреспондентом РАН, в 2022 г. – академиком РАН по



ПРИЛОЖЕНИЯ





Отделению информационных технологий и вычислительных систем (секция вычислительных, локационных, телекоммуникационных систем и элементной базы).

С. А. Никитов – автор более 600 научных статей. Результаты его работ обобщены в 13 монографиях и учебных пособиях. Он активно работает в области подготовки квалифицированных научных и научно-педагогических кадров, будучи заведующим кафедрой прикладных информационных технологий Московского физико-технического института и заведующим кафедрой информационной безопасности Российского нового университета, г. Москва. Под его руководством защищено 12 кандидатских диссертаций.

С. А. Никитов – член организационных и программных комитетов крупнейших национальных и международных конференций (INTERMAG, International Conference on Ferrites, European Conference on Magnetism and Magnetic Applications). Он является постоянным со-руководителем международного семинара по нелинейным явлениям в твердых телах. Был стипендиатом фондов Гумбольдта (Германия) и Ландау–Вольфа (Италия).

Научно-исследовательская и организационная работа С. Н. Никитова тесно связана с Саратовским национальным исследовательским государственным университетом имени Н. Г. Чернышевского (СГУ).

В 2010 г. в рамках конкурса «мегагрантов» первой волны под руководством ведущих ученых проект С. А. Никитова по созданию в СГУ научной лаборатории «Метаматериалы» был признан победителем. Спустя год лаборатория была открыта в День российской науки. Были определены четыре направления работы лаборатории: фотонные кристаллы (руководитель Д. А. Усанов), фононные кристаллы (руководитель С. Г. Сучков), плазмонные кристаллы (руководители В. В. Попов и Н. Г. Хлебцов), магنونные кристаллы (руководитель Ю. П. Шараевский). В рамках развития этих направлений в течение 2010–2016 гг. в составе Научно-исследовательского института механики и физики (НИИМФ) СГУ, руководителем которого становится С. А. Никитов, создается научная лаборатория мирового уровня.

В июле 2012 г. в СГУ была проведена выездная сессия Научного совета РАН по физике конденсированных сред. Особый интерес вызвали работы, проводимые в лаборатории «Метаматериалы». В августе 2014 г. в СГУ в рамках мегагранта под руководством С. А. Никитова была проведена международная конференция «Бриллюэновская и микроволновая спектроскопия магнитных микро- и наноразмерных структур» («BrilMicS-2014»). Основной задачей конференции было обсуждение дорожной карты развития направления «Магنونика» в мировом научном пространстве. Спустя 10 лет, в августе 2024 г., в стенах СГУ С. А. Никитов выступил организатором Международного симпозиума по спиновым волнам («Spin Waves-2024»). Соорганизаторами научного симпозиума выступили ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН и Научный совет РАН по физике конденсированных сред.

Сергей Аполлонович Никитов входит в состав попечительского совета СГУ и играет ключевую роль в развитии современных научных направлений в СГУ, способствующих достижению результатов мирового уровня в области спин-волновых процессов.

С 2019 г. в СГУ реализуется крупный грант Российского научного фонда (РНФ) «Метаповерхности для управления спин-волновыми процессами в магнитных микро- и наноразмерных структурах» (2019–2025 гг.) с привлечением инфраструктуры мирового уровня – Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» Института физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород). С 2023 г. по гранту РНФ для лабораторий мирового уровня проводятся исследования по теме «Наноразмерные многофункциональные устройства магنونной логики и резервуарных вычислений на спиновых волнах в периодических магнитных гетероструктурах» (2023–2026 гг.).

Достижения С. А. Никитова в области науки и образования признаны на государственном уровне. В 2009 г. ему была присуждена Премия Правительства РФ в области образования. В 2021 г. он был награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени.

***Поздравляем Сергея Аполлоновича Никитова
со знаменательной датой,
желаем здоровья и новых творческих успехов!***

Редколлегия



ISSN 1817-3020 (Print). ISSN 2542-193X (Online)
Известия Саратовского университета. Новая серия.
Серия: Физика. 2025. Том 25, выпуск 1

ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия

Серия: Акмеология образования. Психология развития

Серия: История. Международные отношения

Серия: Математика. Механика. Информатика

Серия: Науки о Земле

Серия: Социология. Политология

Серия: Физика

Серия: Филология. Журналистика

Серия: Философия. Психология. Педагогика

Серия: Химия. Биология. Экология

Серия: Экономика. Управление. Право

