

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

ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия

Серия: Физика

2026

Том 26

Выпуск 2



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 2



Научный журнал
2026 Том 26

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

Издается с 2005 года

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

СОДЕРЖАНИЕ

Научный отдел

Биофизика и медицинская физика

- Машков К. В., Скрипаль Ан. В., Сагайдачный А. А., Бахметьев А. С.**
Оценка тонуса микроциркуляторного русла по изменению индексов резистентности магистральных артерий ультразвуковой доплерографии при проведении окклюзионной пробы 136
- Агапов А. В., Булавин М. В., Гаевский В. Н., Галушко А. В., Индюкова М. Д., Мицын Г. В., Рзянина А. В., Углова С. С., Ямурзин В. Р.**
Сравнение радиочувствительности клеток линии А549 при гамма-облучении на установке «Рокус-М» и канале № 3 реактора ИБР-2 149
- Салов И. А., Скрипаль Ан. В., Ломовицкая М. В., Жильнио Е. Ю., Машков К. В.**
Ультразвуковая диагностика гипоксии плода 158
- Шабунина А. Ю., Оломская В. В., Русанова Т. Ю., Горячева И. Ю.**
Влияние пиридоксина и его производных на флуоресцентные свойства квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных растворах и на поверхности полиакрилонитрильных волокон 165

Твердотельная электроника, микро- и наноэлектроника

- Глухова О. Е., Крачковская Т. М., Петрунин А. А.**
Прогностическая оценка скорости испарения бария с поверхности металлопористого термоматода: математическая модель на основе экспериментальных данных для катодов В- и М-типов 175
- Михайлов А. И., Митин А. В.**
Неустойчивости пространственного заряда и тока в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия 185
- Барков П. В., Слепченков М. М., Глухова О. Е.**
Влияние диаметра отверстия и карбонильных групп на электронные свойства тонких плёнок перфорированного графена с почти круглыми отверстиями 210

Физика конденсированного состояния вещества

- Милинский А. Ю., Барышников С. В.**
Диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе бромиды диизопропиламмония и микрочастиц меди 218

Нанотехнологии, наноматериалы и метаматериалы

- Исаева Е. А., Исаева А. А., Алонова М. В.**
Акустоэмиссионный метод анализа структурной эволюции пеноподобных сред 225

Методический отдел

- Аникин В. М.**
Искусственный интеллект с позиции физика и данных LLM DeepSeek 233

Университетская летопись

Из истории физики

- Аникин В. М.**
«Особенно выделяется студент Леонтьев...»
(К биографии профессора Константина Александровича Леонтьева) 243

Приложение

Personalia

- Биографические бифуркации профессора Андрея Всеволодовича Стальмахова. К 70-летию со дня рождения 260

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 входит в ЕПНИ (Белый список), 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,

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 23.06.2026.

Подписано в свет 30.06.2026.

Выход в свет 30.06.2026.

Формат 60 × 84 1/8.

Усл. печ. л. 15.17 (16.25).

Тираж 100 экз. Заказ 36-Т.

Отпечатано в типографии Саратовского университета.

Адрес типографии:

410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский университет, 2026



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 Р7.0.5-2008 «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 редколлегию 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

Biophysics and Medical Physics

Mashkov K. V., Skripal An. V., Sagaidachnyi A. A., Bakhmetyev A. S.
Assessment of microcirculatory tone based on changes in resistive indices of major arteries measured by Doppler ultrasound during an occlusion test 136

Agapov A. V., Bulavin M. V., Gayevsky V. N., Galushko A. V., Indyukova M. D., Mytsin G. V., Rzyanina A. V., Uglova S. S., Yamurzin V. R.
Comparison of the radiosensitivity of a549 cells under gamma irradiation at the Rokus-M facility and at the channel No. 3 of the IBR-2 reactor 149

Salov I. A., Skripal An. V., Lomovitskaia M. V., Zhilnio E. Yu., Mashkov K. V.
Ultrasonographic evaluation of fetal hypoxia 158

Shabunina A. Yu., Olomskaya V. V., Rusanova T. Yu., Goryacheva I. Yu.
The effect of pyridoxine and its derivatives on the fluorescent properties of AgInS₂/ZnS quantum dots in aqueous solutions and on the surface of polyacrylonitrile fibers 165

Solid-State Electronics, Micro- and Nanoelectronics

Glukhova O. E., Krachkovskaya T. M., Petrunin A. A.
Predictive evaluation of barium evaporation rate from the surface of a porous metal thermionic cathode: A mathematical model based on experimental data for B- and M-type cathodes 175

Mikhailov A. I., Mitin A. V.
Space charge and current instabilities in structures based on semi-insulating gallium arsenide 185

Barkov P. V., Slepchenkov M. M., Glukhova O. E.
Influence of hole diameter and carbonyl groups on the electronic properties of thin films of perforated graphene with almost circular holes 210

Physics of Condensed Matter

Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V.
Dielectric and thermal properties of composites based on diisopropylammonium bromide and copper microparticles 218

Nanotechnologies, Nanomaterials and Metamaterials

Isaeva E. A., Isaeva A. A., Alonova M. V.
Acoustic emission method for analyzing the structural evolution of foam-like media 225

Methodological Part

Anikin V. M.
Artificial Intelligence from a Physicist's Perspective and Data by LLM DeepSeek 233

University Chronicle

From the History of Physics

Anikin V. M.
“The student Leontiev stands out in particular...”
(On the biography of Professor Konstantin Alexandrovich Leontiev) 243

Appendix

Personalia

Biographical bifurcations of professor Andrei V. Stalmakhov: On the 70th anniversary of his birth 260



**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)

**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)

Alexander V. Skripal (Saratov, Russia)

Gleb B. Sukhorukov (London, UK)

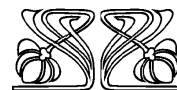
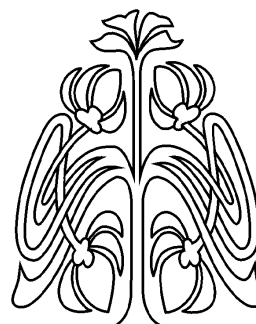
Tatyana E. Vadviasova (Saratov, Russia)

Sergey I. Vinitzky (Dubna, Russia)

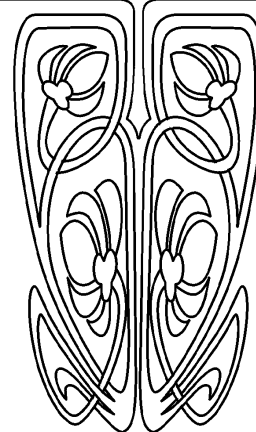
Sergey B. Venig (Saratov, Russia)

Anna S. Zakharova (Berlin, Germany)

Dan Zhu (Wuhan, China)



**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ**





БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 136–148
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 136–148
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-136-148>, EDN: JJCJQI

Научная статья
УДК 616-072.7:612.13:612.135

Оценка тонуса микроциркуляторного русла по изменению индексов резистентности магистральных артерий ультразвуковой доплерографии при проведении окклюзионной пробы

К. В. Машков¹, Ан. В. Скрипаль^{1✉}, А. А. Сагайдачный¹, А. С. Бахметьев^{1,2}

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 Министерства здравоохранения Российской Федерации, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

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

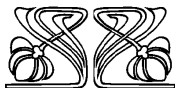
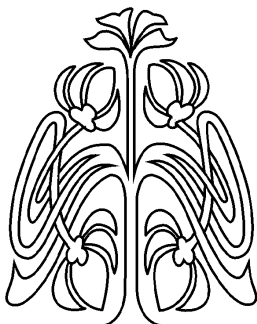
Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой медицинской физики Института физики, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, AuthorID: 33340

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

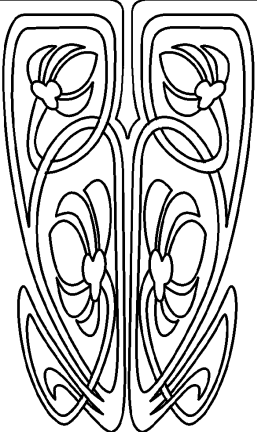
Бахметьев Артем Сергеевич, кандидат медицинских наук, ¹старший научный сотрудник кафедры медицинской физики Института физики, ²доцент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии им. Н. Е. Штерна, bakhmetev.artem@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3814-5515>, AuthorID: 641079

Аннотация. В работе предложен усовершенствованный метод расчёта индекса резистентности магистральных артерий. Подход основан на анализе скоростных характеристик кровотока и учитывает ситуации, при которых знак ретроградной составляющей кровотока может изменяться с отрицательного на положительный. Это позволяет обеспечить непрерывность значений индекса резистентности при проведении функциональных проб, при которых сосудистое сопротивление может изменяться от низкого до высокого, тем самым устраняя одно из ключевых ограничений традиционных методов. С использованием ультразвуковой доплерографии в условиях постокклюзионной реактивной гиперемии была установлена количественная взаимосвязь между динамикой индекса резистентности плечевой артерии, объёмным кровотоком и состоянием тонуса микроциркуляторного русла. Показано, что между объёмным кровотоком и индексом резистентности существует отрицательная корреляция. На основе полученных результатов предложена количественная характеристика тонуса микроциркуляторного русла, которая связана с индексом резистентности и может быть рассчитана по данным стандартного ультразвукового исследования без необходимости использования дополнительного оборудования.

Ключевые слова: индекс резистентности, ультразвуковая доплерография, окклюзионная проба, микроциркуляция, тонус сосудов, постокклюзионная реактивная гиперемия, объёмный кровоток, ретроградный кровоток



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-25-01101, <https://rscf.ru/project/25-25-01101/>).

Для цитирования: Машков К. В., Скрипаль Ан. В., Сагайдачный А. А., Бахметьев А. С. Оценка тонуса микроциркуляторного русла по изменению индексов резистентности магистральных артерий ультразвуковой доплерографии при проведении окклюзионной пробы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 136–148. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-136-148>, EDN: JQIQ

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

Article

Assessment of microcirculatory tone based on changes in resistive indices of major arteries measured by Doppler ultrasound during an occlusion test

K. V. Mashkov¹, An. V. Skripal¹✉, A. A. Sagaidachnyi¹, A. S. Bakhmetyev^{1,2}

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

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

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

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

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

Artem S. Bakhmetyev, bakhmetev.artem@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3814-5515>, AuthorID: 641079

Abstract. Background and Objectives: This study investigates the quantitative assessment of microcirculatory vascular tone using ultrasound Dopplerography after an occlusion test. The objective was to establish the relationship between changes in resistance indices of major arteries, volumetric blood flow, and the functional state of the microcirculatory bed. **Materials and Methods:** The study included 8 healthy volunteers (4 males and 4 females) with a mean age of 20 ± 2 years. Spectral Doppler waveforms were recorded in the brachial artery distal to the cuff occlusion site. The occlusion test was performed for 3 min, followed by continuous Doppler recording from the moment of cuff release until restoration of baseline hemodynamic parameters. The resistance index was calculated based on the retrograde component of blood flow, taking into account the direction of velocity depending on peripheral resistance conditions. Volumetric blood flow Q was calculated automatically using the time-averaged linear flow velocity measured by pulsed-wave Doppler and the brachial artery diameter obtained in B-mode. Given the limited sample size ($n = 8$), paired comparisons were conducted using the nonparametric Wilcoxon signed-rank test. **Results:** Immediately after cuff release, a pronounced hyperemic response has been observed, characterized by the elevated systolic blood flow velocity and a positive retrograde component that persisted for several seconds. Within approximately 20 s, the Doppler waveform evolved into a triphasic pattern, indicating a gradual increase in peripheral vascular resistance. This transition is accompanied by a decrease in systolic velocity and a change in the direction of the retrograde component. After 60 s, a fully developed triphasic flow pattern has been observed, reflecting restoration of vascular tone. The inverse relationship between the resistance index and volumetric blood flow has been identified. Based on this relationship, a new parameter reflecting microcirculatory tone has been introduced, demonstrating sensitivity to dynamic changes during post-occlusive recovery. **Conclusion:** The proposed approach allows for continuous assessment of peripheral vascular tone using ultrasound Dopplerography. The use of the retrograde flow component enables one to overcome the methodological limitations of conventional indices and improve the reliability of measurements under different flow patterns.

Keywords: resistive index, Doppler ultrasound, occlusion test, microcirculation, vascular tone, post-occlusive reactive hyperemia, volumetric blood flow, retrograde blood flow

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-25-01101, <https://rscf.ru/project/25-25-01101/>).

For citation: Mashkov K. V., Skripal An. V., Sagaidachnyi A. A., Bakhmetyev A. S. Assessment of microcirculatory tone based on changes in resistive indices of major arteries measured by Doppler ultrasound during an occlusion test. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 136–148 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-136-148>, EDN: JQIQ

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

Введение

Состояние микроциркуляторного русла определяет адекватность выполнения сердечно-сосудистой системой основных гемодинамических функций по транскапиллярному обмену веществ и газов, а также поддержания метаболического гомеостаза. Нарушения микрогемодинамики лежат в основе патогенеза широкого спектра заболеваний: артериальной гипертензии, атеросклероза, сахарного диабета

и системного васкулита [1, 2]. В связи с этим оценка функционального состояния микрососудов представляется критически важной как для понимания механизмов заболеваний, так и для мониторинга эффективности проводимого лечения.

Ключевым параметром, контролирующим объём кровотока в микроциркуляторном русле, является сосудистый тонус. Он формируется за счёт взаимодействия нескольких регуляторных



механизмов: активности гладкомышечных клеток артериол (феномен Остроумова–Бейлисса), нейрогенной симпатической иннервации, гуморальных факторов (ангиотензина II и катехоламинов), а также локально продуцируемых эндотелиальных медиаторов: оксида азота, эндотелинов и простаглицлина [3–5]. Микроциркуляторное русло (и в особенности его прекапиллярный отдел – артериолы) является основным резистивным звеном сосудистой системы, на долю которого приходится от 70 до 90% общего периферического сопротивления [6].

Помимо активного тонуса гладкомышечных клеток, на объём кровотока оказывает влияние пассивная упругость эластических волокон сосудистой стенки. Стенка артерии представляет собой состоящий из эластина, коллагена и внеклеточного матрикса композитный материал, механические свойства которого могут существенно изменяться под воздействием гладкомышечных клеток [7]. Совокупность структурных (эластин, коллаген) и функциональных (тонус гладкомышечных клеток) компонент формирует интегральный показатель жёсткости сосудистой стенки [8], а динамика этого показателя в условиях функциональных нагрузочных тестов позволяет селективно оценивать функциональное состояние и резервные возможности гладкомышечного и эндотелиального звеньев регуляции сосудистого тонуса [9–11].

Для оценки способности сосудов реагировать на внешние стимулы, в том числе на изменяющееся давление крови на стенку сосуда, может использоваться понятие реактивности сосудов [12]. Однако этот параметр, как и показатель жесткости, является интегральным и хуже характеризует функциональный компонент сосудистой системы, проявляющийся в вариациях объёмного кровотока при изменении тонуса артериол, вызванного реакцией гладкомышечных клеток на изменяющиеся физиологические условия.

Одним из наиболее физиологически обоснованных функциональных тестов является окклюзионная проба, или тест постокклюзионной реактивной гиперемии [13]. Моделируя кратковременную ишемию с последующей реперфузией, она провоцирует каскад вазоактивных реакций – прежде всего эндотелий-зависимую вазодилатацию. Стандартный протокол предполагает создание полной компрессионной окклюзии конечности путём нагнетания воздуха в манжете и создания давления выше систолического

в течение 3–5 мин с последующей быстрой декомпрессией и регистрацией гемодинамического ответа [14].

Изменения сосудистого тонуса в ходе окклюзионной пробы происходят последовательно в три взаимосвязанные фазы. В фазе окклюзии падение трансмурального давления запускает миогенный ответ: гладкомышечные клетки сосудистой стенки расслабляются пропорционально снижению механической нагрузки растяжения, уменьшая периферическое сосудистое сопротивление [3]. Параллельно нарастающая тканевая гипоксия обуславливает накопление вазоактивных метаболитов – CO_2 , H^+ , K^+ , лактата и аденозина, – которые оказывают прямое дилататорное воздействие на гладкую мускулатуру артериол и прекапиллярных сфинктеров [14]. Совокупное действие обоих механизмов прогрессивно снижает периферическое сосудистое сопротивление на протяжении всего периода окклюзии: чем продолжительнее ишемия, тем больше падение сопротивления и тем выраженнее последующий пиковый прирост кровотока [14]. В фазе реперфузии восстановление перфузионного давления при уже существенно сниженном сосудистом сопротивлении обеспечивает резкий скачок кровотока. Нарастающее напряжение сдвига на эндотелии активирует эндотелиальную NO-синтазу (синтез оксида азота) и последующее расслабление гладкомышечных клеток, поддерживая и продлевая фазу дилатации; суммарный вклад NO в гиперемический ответ оценивается на уровне 30–47% в зависимости от сосудистого бассейна [14, 15]. В фазе восстановления по мере вымывания вазодилататорных метаболитов и нормализации парциального давления кислорода миогенный тонус резистивных артериол постепенно восстанавливается, и перфузия возвращается к первоначальному уровню. Скорость и полнота этого восстановления являются самостоятельными диагностическими параметрами, отражающими состояние эндотелиальной функции и нейромиогенного контроля тонуса [14, 16]. Наблюдение за тем, как изменяются индексы резистентности магистральных артерий в ответ на окклюзию, позволяет оценить функциональный резерв микроциркуляторного русла, его способность к адекватной вазомоции и выявить скрытые формы сосудистой недостаточности, не фиксируемые при стандартном исследовании покоя.

Количественные показатели тонуса сосудов обычно связывают с объёмом кровотока микроциркуляторного русла; они могут быть выражены



через количественные показатели, получаемые при ультразвуковой доплерографии. В основе этой связи лежит тот факт, что микроциркуляторное русло (и, в особенности, его прекапиллярный отдел – артериолы), является основным резистивным звеном сосудистой системы, на долю которого приходится от 70 до 90% общего периферического сопротивления [17]. Микроциркуляторное русло играет важную роль в регуляции системной гемодинамики [18]. Тонус гладкомышечных клеток артериол определяет величину их просвета и, следовательно, сопротивление току крови, что напрямую влияет на объём кровотока в капиллярной сети [19]. Количественными маркерами этого сопротивления при ультразвуковой доплерографии служат индекс резистентности (RI), также известный как индекс Пурсело, и пульсационный индекс (PI), или индекс Гослинга [20, 21].

Оба эти индекса характеризуют сопротивление в сосудистой системе: повышенный тонус артериол (вазоконстрикция) увеличивает сопротивление, что проявляется в снижении диастолической скорости кровотока и, как следствие, росте значений RI и PI . И наоборот, снижение тонуса (вазодилатация) облегчает диастолический кровоток, что ведёт к уменьшению этих индексов. Экспериментальные данные подтверждают, что сопротивление кровотоку в микрососудах диаметром менее 40 мкм значительно выше, чем в более крупных сосудах, что обосновывает использование доплерографических индексов магистральных артерий как косвенных маркеров состояния микроциркуляторного русла [3, 22].

Клинические исследования наглядно демонстрируют эту связь: у пациентов с артериальной гипертензией, характеризующейся повышенным тонусом резистивных сосудов и их структурным ремоделированием, наблюдается не только снижение базальной перфузии коркового слоя почек, но и нарушение ее прироста в ответ на стрессовые стимулы [23]. Для оценки функционального резерва микроциркуляторного русла используется концепция резерва микрососудистого сопротивления (*microvascular resistance reserve, MRR*), величина которого рассчитывается на основе измерения абсолютного коронарного кровотока и сопротивления в покое и при гиперемии [24].

Современные методики расчёта индекса резистентности RI и пульсационного индекса PI чаще всего основаны на анализе антеградного кровотока [25]. При расчёте этих индексов с использованием ретроградного кровотока у исследователей возникает неопределённость при

исчезновении ретроградного кровотока. Вследствие этого у лиц с высоким исходным микрососудистым сопротивлением использование для определения влияния тонуса на доплерографические индексы при проведении окклюзионной пробы по известным методикам оказывается невозможным.

Нами предлагается новый метод расчёта индекса резистентности RI , у лиц с высоким исходным сопротивлением сосудистого русла по значениям скорости в области ретроградного кровотока, даже когда знак ретроградного кровотока изменяется с отрицательного на положительный. Мы полагаем, что наблюдающийся провал на кривой доплерографического спектра связан с началом формирования обратного кровотока. Предложенное в данной работе соотношение для вычисления индекса резистентности по значениям скорости в области формирования ретроградного кровотока позволяет получить непрерывную зависимость изменения тонуса сосудов при проведении окклюзионной пробы у лиц с высоким исходным микрососудистым сопротивлением [26].

Целью работы явилось установление количественной связи между изменением индексов резистентности магистральных артерий, объёмного кровотока и тонусом микроциркуляторного русла с использованием методов ультразвуковой доплерографии в процессе проведения окклюзионной пробы.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 8 здоровых добровольцев (четверо юношей и четыре девушки) с возрастом 20 ± 2 года. Перед началом эксперимента каждый участник был подробно проинформирован о целях, задачах и методах исследования, после чего дал письменное согласие на участие в соответствии с этическими нормами биомедицинских исследований.

Настоящее исследование одобрено Комитетом по этике Саратовского государственного медицинского университета им. В. И. Разумовского (протокол от 4.04.2023 г. № 9) и проводилось в клинических условиях под наблюдением медицинского персонала.

Для регистрации спектральной доплерограммы (развертки скорости кровотока во времени) использовался ультразвуковой аппарат экспертного класса «HD 15 XE» (Philips, Нидерланды) с датчиком 7.2 МГц. При измерении гемодинамических параметров использовалось



несколько режимов: В-режим – для визуализации анатомии сосудистого русла; цветовое доплеровское картирование (CD) – для локализации артериального кровотока; импульсно-волновой доплер (PW Doppler) – для получения количественных параметров скорости кровотока.

Регистрация спектральной доплерограммы осуществлялась в плечевой артерии левой руки участников исследования ниже места проведения манжеточной окклюзии. Окклюзионная проба проводилась в течение 3 мин. После выполнения окклюзионной пробы регистрировали параметры кровотока по УЗИ-доплерограммам с непрерывной записью кинопетли с момента снятия окклюзии до восстановления значений гемодинамических показателей, сопоставимых с исходными. Расчёт индекса резистентности (RI_r), вычисленный по ретроградному кровотоку, выполняли по данным доплерографии по формуле:

$$RI_r = \frac{V_{ps} - V_r}{V_{ps}}, \quad (1)$$

где V_{ps} – пиковая систолическая скорость кровотока; V_r – ретроградная составляющая скорости. Знак скорости V_r принимали положительным для доплерограмм артерий с низким периферическим сопротивлением и отрицательным – для доплерограмм артерий с высоким периферическим сопротивлением.

Значения объёмного кровотока Q рассчитывались автоматически с использованием средней скорости линейного кровотока, определяемого в режиме импульсно-волнового доплера, и диаметра плечевой артерии, отслеживаемого в В-режиме УЗИ-аппарата.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программы Statistica 10. В связи с малым объёмом выборки ($n = 8$) для сравнения зависимых групп использовался непараметрический критерий Вилкоксона. Сравнение проводилось между показателями, полученными сразу после окклюзии, а также через 20 и 60 с после окклюзии. Описательная статистика представлена в виде среднего арифметического, медианы (Me), стандартного отклонения (SD). Критический уровень значимости был установлен на уровне $p < 0.05$.

Результаты

Для наглядной иллюстрации выявленных эффектов на рис. 1 представлены ультразвуковые доплерограммы испытуемого 20-летнего возраста, зарегистрированные сразу после снятия

окклюзии, через 20 и через 60 с после её снятия соответственно.

Сразу после снятия окклюзии, согласно данным ультразвуковой доплерографии, пиковая систолическая скорость кровотока V_{ps} составила 223 см/с (см. рис. 1, а). Ретроградный кровоток в данном исследовании учитывался по участку, обозначенному на УЗИ-доплерограмме как V_r . Для всех испытуемых значения ретроградного кровотока V_r имели положительный характер сразу после окклюзии и сохранялись в течение примерно 16–20 с после её снятия. В представленном случае (см. рис. 1, а) максимальная скорость ретроградного кровотока составила 119 см/с.

У данного участника исследования уже через 20 с после снятия окклюзии наблюдался трёхфазный кровоток, который складывается из трёх последовательных компонентов, как отражено на рис. 1, б. Первая фаза – это систолический выброс крови (сердце сокращается, кровь с силой выталкивается в артерии). В этой фазе определялась пиковая систолическая скорость кровотока $V_{ps} = 176$ см/с, уменьшившаяся по сравнению со значением, зарегистрированным сразу после снятия окклюзии. Вторая фаза – ретроградный кровоток со скоростью $V_r = -16$ см/с обратно к сердцу, отражающий нарастание сопротивления периферических сосудов. На графике в этой фазе регистрируется отрицательное (с учётом знака скорости V_r) значение ретроградного кровотока. Третья фаза – медленный прямой диастолический поток, снова направленный к периферии, что на графике проявляется в виде положительных значений скорости кровотока.

Через 60 с после снятия окклюзии у участника исследования отмечается максимально выраженный трёхфазный тип кровотока (рис. 1, в), однако при несколько сниженных значениях систолического компонента: пиковая систолическая скорость составляет $V_{ps} = 121$ см/с, тогда как ретроградная диастолическая волна достигает выраженного отрицательного пика ($V_r = -40$ см/с), что отражает высокое периферическое сопротивление.

На рис. 2 представлен разброс значений индекса резистентности RI_r в исследуемой группе участников исследования. Визуализация отражает межиндивидуальную вариабельность показателя и позволяет оценить диапазон его изменений, а также выявить возможные тенденции распределения значений в выборке.

Индекс резистентности рассчитывали по формуле (1) на основании данных доплерогра-

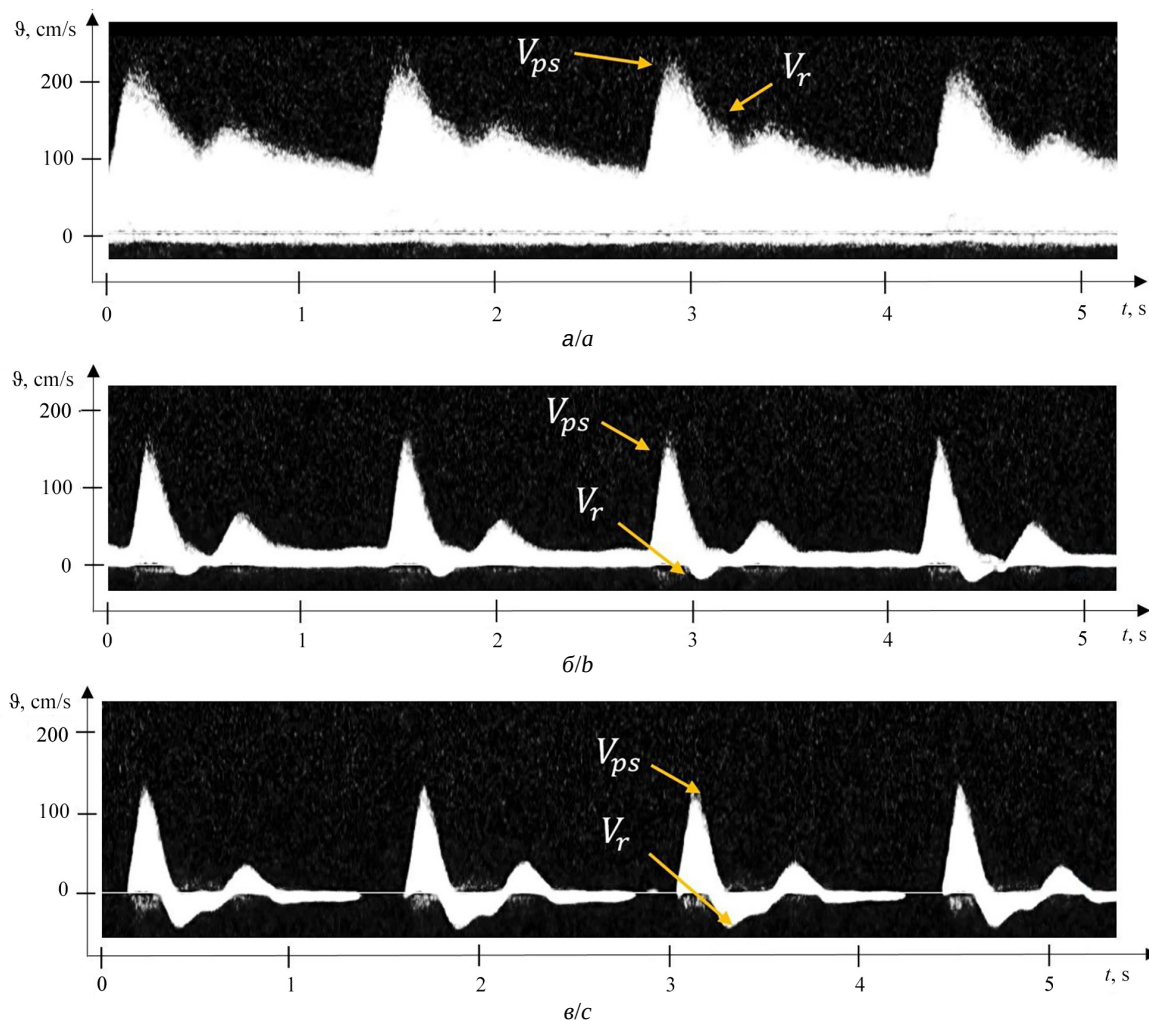


Рис. 1. Спектр доплерограммы кровотока 20-летнего участника исследования: а – в первые секунды после снятия окклюзии (данный паттерн при максимальной вазодилатации); б – спустя 20 с после снятия окклюзии (проявляется трёхфазный паттерн); в – спустя 60 с после снятия окклюзии (трёхфазный паттерн проявляется максимально). V_{ps} – пиковая систолическая скорость; V_r – ретроградная составляющая

Fig. 1. Spectral Doppler waveforms from a 20-year-old subject: а – first seconds after cuff release (pattern corresponding to maximal vasodilation); б – 20 s after cuff release (triphasic pattern emerging); в – 60 s after cuff release (triphasic pattern fully established). V_{ps} – peak systolic velocity; V_r – retrograde component

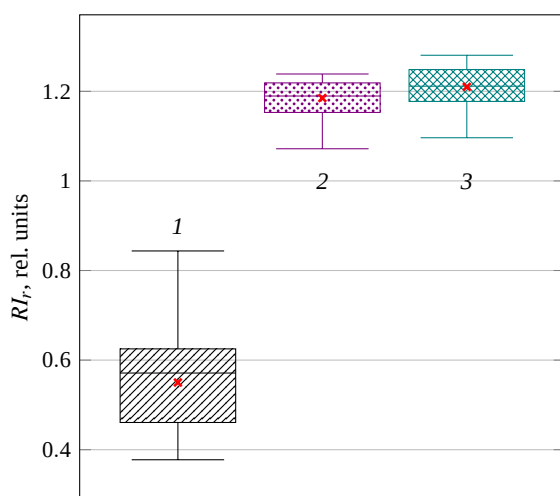


Рис. 2. Распределение значений индекса резистентности RI_r (отн. ед.) по группе ($n = 8$): 1 – разброс значений индекса резистентности в первые секунды после снятия окклюзии; 2 – разброс значений через 20 с после снятия окклюзии; 3 – разброс значений через 60 с после снятия окклюзии (цвет онлайн)

Fig. 2. Distribution of resistance index RI_r values (rel. units) by group ($n = 8$): 1 – spread of resistance index values in first seconds after occlusion; 2 – spread of values 20 s after occlusion; 3 – spread of values 60 s after occlusion (color online)



фического исследования. Полученные значения RI_r использовали для последующего сравнительного и статистического анализа внутри исследуемой группы.

Для оценки динамики индекса резистентности RI_r в условиях постокклюзионной реактивной гиперемии использовался непараметрический критерий Вилкоксона для парных выборок, что было обусловлено малым объемом выборки ($n = 8$).

Значения RI_r , зафиксированные непосредственно после снятия окклюзии, составили в среднем 0.56 отн. ед. ($Me = 0.55$; $SD = 0.14$). Этот момент соответствует пику реактивной гиперемии в плечевой артерии: резкий прирост кровотока после снятия манжеты сопровождается максимальным снижением сосудистого сопротивления, что и отражается в наиболее низких значениях RI_r . Сразу после снятия окклюзии сосудистое русло находится в состоянии наиболее выраженной вазодилатации. Через 20 с после сброса окклюзии RI_r в среднем возрастал до 1.19 отн. ед. ($Me = 1.20$; $SD = 0.05$), а через 60 с – до 1.22 отн. ед. ($Me = 1.23$; $SD = 0.06$), что отражает постепенное восстановление сосудистого тонуса и нормализацию периферического сопротивления.

Сравнение показателей, полученных непосредственно после снятия окклюзии, с данными на 20-й и 60-й секундах выявило статистически значимые различия в обоих случаях ($p < 0.001$). Между значениями на 20-й и 60-й секундах статистически значимых различий обнаружено не было ($p = 0.17$), что указывает на то, что к 20-й секунде сосудистый тонус уже в значительной мере восстановился, а дальнейшая нормализация RI_r происходит более плавно и не достигает статистически значимого прироста в рамках данной выборки. Таким образом, полученные результаты демонстрируют следующую картину: максимальное снижение RI_r непосредственно после снятия окклюзии отражает пик реактивной гиперемии, тогда как последующий быстрый прирост показателя свидетельствует об интенсивном восстановлении сосудистого сопротивления.

Ключевой количественной характеристикой является сопоставление изменения индекса резистентности RI_r и объема кровотока Q по всей группе испытуемых. На рис. 3 представлены индивидуальные кривые зависимости параметра Q (мл/мин) от RI_r (отн. ед.) для всех восьмерых участников исследования.

Прослеживается отрицательная зависимость индекса резистентности RI_r от объема кровотока Q : с увеличением кровотока значения RI_r последовательно снижаются.

При этом, несмотря на выраженную межиндивидуальную вариабельность абсолютных значений кровотока, выявленная зависимость сохранялась у всех обследованных. Это указывает на устойчивость и воспроизводимость наблюдаемого соотношения.

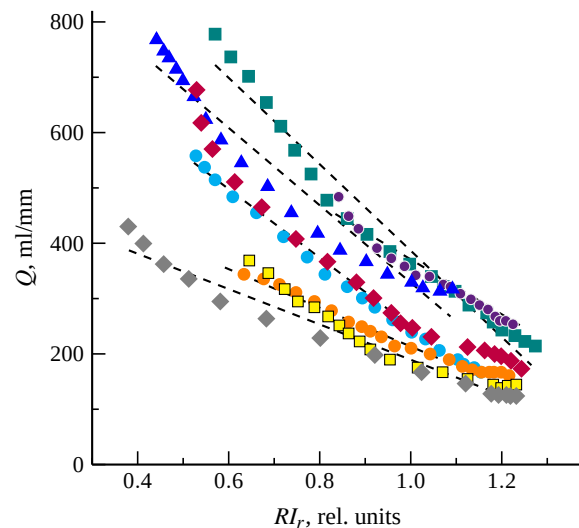


Рис. 3. Зависимости объема кровотока в плечевой артерии левой руки Q (мл/мин) от индекса резистентности RI_r (отн. ед.), рассчитанного по данным ультразвуковой доплерографии, для 8 участников исследования. Пунктирные линии обозначают индивидуальные линии тренда для каждого участника (цвет онлайн)

Fig. 3. Relationships between volumetric blood flow in the left brachial artery Q (ml/min) and resistance index RI_r (rel. units), calculated from ultrasound Doppler measurements, for 8 study participants. Dashed lines indicate individual trend lines for each participant (color online)

Полученные результаты позволяют рассматривать данную связь как отражение общих закономерностей регуляции сосудистого тонуса: в условиях постокклюзионной реактивной гиперемии: увеличение объема кровотока сопровождается снижением сосудистого сопротивления.

Распределение объема кровотока Q представлено на диаграмме размаха (рис. 4). Широкий диапазон значений Q отражает выраженные межиндивидуальные различия участников исследования при сохранении общей тенденции к снижению кровотока с ростом RI_r .

Значения Q , зафиксированные непосредственно после сброса окклюзии, составили в среднем 554.1 мл/мин ($Me = 520.4$; $SD = 167.1$). Этот момент соответствует пику реактивной



гиперемии: резкий прирост кровотока после снятия окклюзии отражает максимальную вазодилатацию и минимальное периферическое сопротивление. Через 20 с после снятия окклюзии Q в среднем снижался до 205.2 мл/мин ($Me = 185.0$; $SD = 63.0$), а через 60 с – до 195.8 мл/мин ($Me = 171.7$; $SD = 61.9$), что отражает быстрое восстановление сосудистого тонуса и нормализацию объёмного кровотока.

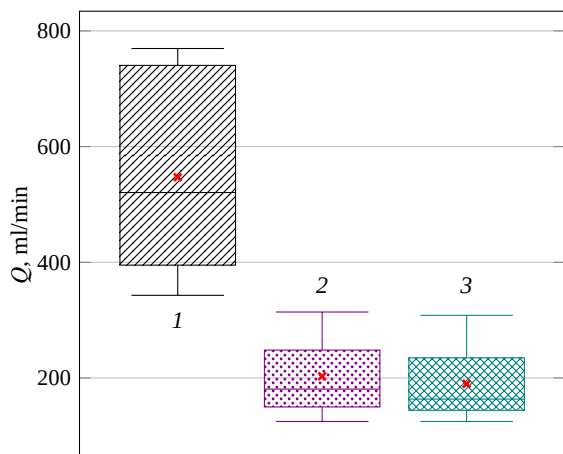


Рис. 4. Распределение значений объёмного кровотока Q (мл/мин) в группе ($n = 8$): 1 – разброс значений объёмного кровотока в первые секунды после снятия окклюзии; 2 – разброс значений через 20 с после снятия окклюзии; 3 – разброс значений через 60 с после снятия окклюзии (цвет онлайн)

Fig. 4. Distribution of volumetric blood flow values Q (ml/min) by group ($n = 8$): 1 – spread of volumetric blood flow values in first seconds after occlusion; 2 – spread of values 20 seconds after occlusion; 3 – spread of values 60 seconds after occlusion (color online)

Сравнение показателей непосредственно после окклюзии с обеими последующими точками выявило статистически значимые различия ($p = 0.008$ в обоих случаях). Между значениями на 20-й и 60-й секундах также было выявлено статистически значимое различие ($p = 0.016$), что указывает на продолжающееся снижение объёмного кровотока в этом интервале, хотя и менее выраженное.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют следующую картину: максимальный прирост Q непосредственно после сброса окклюзии и практически полное отсутствие ретроградного кровотока отражают пик реактивной гиперемии, тогда как последующее снижение Q , сопровождающееся снижением скорости в области формирования ретроградного кровотока, свидетельствует о постепенном восстановлении тонуса микроциркуляторного русла. Процесс восстановления тонуса микроциркуляторного русла

T_r может быть записан в виде соотношения, зависящего от относительной величины ретроградного кровотока:

$$T_r = \frac{V_{ps} - V_r}{2 \cdot V_{ps}}. \quad (2)$$

Нулевое значение тонуса соответствует максимальному расслаблению гладких мышц артериальной системы микроциркуляторного русла. При этом влияние продолжительности окклюзии (от 2 мин и более) на форму доплерограмм сразу после окклюзии выявлено не было. Значение тонуса, равное 0.5, соответствует смене знака кровотока с положительного на отрицательное. Значение тонуса, равное 1, является теоретическим и невозможным физиологически, поскольку отражало бы тот факт, что обратный кровоток был бы равен величине прямого кровотока. Максимально возможное значение тонуса в наших исследованиях достигало величины $T_r = 0.65$ и наблюдалось у юноши, занимавшегося спортом и имеющего спортивный разряд кандидата в мастера спорта.

Для спектральных доплерограмм, приведенных на рис. 1, значения тонуса T_r составили: в первые секунды после снятия окклюзии $T_r = 0.23$ (см. рис. 1, а); спустя 20 с после снятия окклюзии $T_r = 0.55$ (см. рис. 1, б); спустя 60 с после снятия окклюзии $T_r = 0.67$ (см. рис. 1, в). На рис. 5 приведён разброс значений тонуса по группе испытуемых.

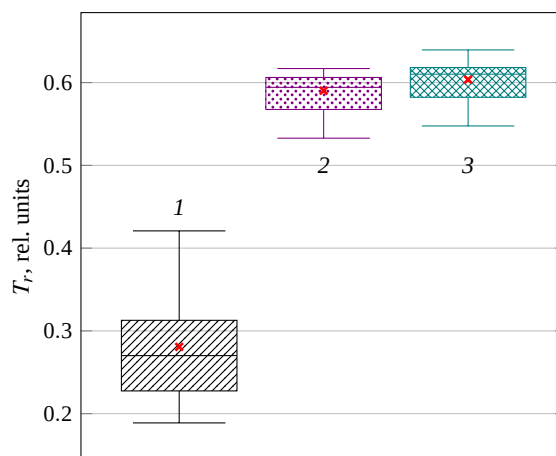


Рис. 5. Распределение значений тонуса T_r (отн. ед.) в группе ($n = 8$): 1 – в первые секунды после снятия окклюзии; 2 – спустя 20 с после снятия окклюзии; 3 – спустя 60 с после снятия окклюзии (цвет онлайн)

Fig. 5. Distribution of tone values T_r (rel. units) by group ($n = 8$): 1 – spread of tone values in first seconds after occlusion; 2 – spread of tone values 20 seconds after occlusion; 3 – spread of tone values 60 seconds after occlusion (color online)



Значения T_r , зафиксированные непосредственно после сброса окклюзии, составили в среднем 0.28 отн. ед. ($Me = 0.28$; [$Q1 = 0.23$; $Q3 = 0.31$]; $SD = 0.07$), что соответствует состоянию вазодилатации на пике реактивной гиперемии. Через 20 секунд после сброса окклюзии T_r в среднем возрастал до 0.59 отн. ед. ($Me = 0.6$; [$Q1 = 0.57$; $Q3 = 0.61$]; $SD = 0.03$), а через 60 секунд – до 0.6 отн. ед. ($Me = 0.613$; [$Q1 = 0.57$; $Q3 = 0.61$]; $SD = 0.028$), что отражает быстрое восстановление сосудистого тонуса.

Сравнение показателей непосредственно после окклюзии с обеими последующими точками выявило статистически значимые различия в обоих случаях ($p = 0.008$). Между значениями на 20-й и 60-й секундах статистически значимых различий обнаружено не было ($p = 0.312$).

Обсуждение результатов

Оценка тонуса микроциркуляторного русла лежит в основе диагностики как функционального состояния сердечно-сосудистой системы человека, так и различных патологий сосудистой системы. В частности, в работе [26] дисфункцию эндотелия, при которой возникает дисбаланс биологически активных веществ, характеризующийся гиперпродукцией вазоконстрикторов, протромбогенных и провоспалительных факторов, напрямую связывают с тонусом микроциркуляторного русла.

Для того чтобы отличить возрастное изменение жесткости эластического компонента сосудов и коллагена от дисфункции эндотелия, используют метод окклюзионной пробы, разработанный D. S. Celermajer с соавторами в 1992 г. [27]. Во время проведения пробы происходит эндотелий-опосредованное высвобождение оксида азота (NO), что приводит к вазодилатации и отражает вазомоторную функцию эндотелия, которую можно количественно оценить [15, 28, 29].

При проведении окклюзионной пробы значительно изменяется индекс резистентности, который, как считают исследователи, характеризует тонус мелких мышечных артерий. Миогенный тонус является отличительной чертой резистивных артерий и питающихся от них артериол [30, 31]. Он обеспечивает уровень сократительной активности гладких мышц в состоянии покоя, благодаря чему резистивные артерии и артериолы могут как расширяться, так и сужаться относительно своих диаметров покоя, поддерживая сердечно-сосудистый гомеостаз [32]. Таким

образом, проведение окклюзионной пробы, приводящей к изменению индекса резистентности, позволяет выделить миогенный тонус из жесткости других структур, входящих в состав стенки сосудов.

Проведённое нами исследование позволило установить количественную взаимосвязь между динамикой индекса резистентности RI_r магистральных артерий, величиной ретроградного кровотока V_r и тонусом микроциркуляторного русла T_r в ходе окклюзионной пробы у здоровых молодых добровольцев. Нами показана отрицательная корреляция между RI_r плечевой артерии и объёмным кровотоком Q , а также зависимость тонуса сосудов T_r от скорости ретроградного кровотока.

Описанная в настоящей работе методика расчёта RI_r с использованием значений скорости в области ретроградного кровотока, в том числе при его инверсии от отрицательного к положительному значению, устраняет ключевое методологическое ограничение стандартного подхода. Стандартные методики расчёта RI и PI основаны на анализе конечных антеградных компонент кровотока [25], и для определённых сосудов с характерной нулевой или близкой к нулевой конечной диастолической скоростью вычисление RI оказывается некорректным или неопределённым. Предложенное нами соотношение обеспечивает непрерывность функции RI_r на протяжении всей временной кривой окклюзионной пробы, что принципиально важно для измерения на разных типах сосудов. Широкий разброс исходных значений RI_r в нашей выборке (от 0.38 до 1.28) соответствует данным литературы при значительной межличностной вариабельности этого параметра даже у здоровых лиц.

Введённый нами показатель тонуса T_r , рассчитываемый по величине ретроградного кровотока, представляет собой приближение, основанное на зависимости величины ретроградного кровотока от средней скорости обратного кровотока V_r .

Выводы

Проведённое исследование продемонстрировало возможность количественной оценки состояния микроциркуляторного русла на основе данных ультразвуковой доплерографии в условиях постокклюзионной реактивной гиперемии. Анализ спектральных доплерограмм показал,



что восстановление трёхфазного паттерна кровотока после снятия манжеточной окклюзии сопровождается закономерными изменениями гемодинамических показателей: нарастанием ретроградной составляющей (V_r), снижением пиковой систолической скорости (V_{ps}), что отражает постепенное восстановление периферического сосудистого тонуса.

Выявленная отрицательная корреляция между объёмным кровотоком, который зависит от тонуса микроциркуляторного русла, и индексом резистентности, послужила основанием для введения показателя тонуса микроциркуляторного русла T_r , определяемого по величине ретроградного кровотока. Данный показатель легко воспроизводим и не требует дополнительного оборудования помимо стандартного УЗИ-аппарата. Дальнейшие исследования на расширенных выборках позволят верифицировать референсные значения показателя T_r и оценить его диагностическую значимость при различных патологических состояниях.

Список литературы

1. Литвицкий П. Ф. Нарушения регионарного кровотока и микроциркуляции // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2020. Т. 19, № 1. С. 82–92. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2020-19-1-82-92>
2. Королев А. И., Федорович А. А., Горшков А. Ю., Дранкина О. М. Микроциркуляторное русло кожи при эссенциальной артериальной гипертензии // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2020. Т. 19, № 2. С. 4–10. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2020-19-2-4-10>
3. Jackson W. F. Myogenic tone in peripheral resistance arteries and arterioles: The pressure is on! // *Frontiers in Physiology*. 2021. Vol. 12. Art. 699517. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.699517>
4. Федорович А. А., Гориева Ш. Б., Рогоза А. Н., Чихладзе Н. М. Функциональное состояние артериолярных и венолярных микрососудов кожи у пациентов с гипертонической болезнью // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2014. Т. 13, № 3. С. 45–60. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2014-13-3-45-60>
5. Mućka S., Miodońska M., Jakubiak G. K., Starzak M., Cieślak G., Stanek A. Endothelial function assessment by flow-mediated dilation method: A valuable tool in the evaluation of the cardiovascular system // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, iss. 18. Art. 11242. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811242>
6. Levy B. I., Schiffrin E. L., Mourad J. J., Agostini D., Vicaat E., Safar M. E., Struijker-Boudier H. A. Impaired tissue perfusion: A pathology common to hypertension, obesity, and diabetes mellitus // *Circulation*. 2008. Vol. 118, № 9. P. 968–976. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.763730>
7. Giudici A., Wilkinson I. B., Khir A. W. Review of the techniques used for investigating the role elastin and collagen play in arterial wall mechanics // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2021. Vol. 14. P. 256–269. <https://doi.org/10.1109/RBME.2020.3005448>
8. Reesink K. D., Spronck B. Constitutive interpretation of arterial stiffness in clinical studies: A methodological review // *American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology*. 2019. Vol. 316, № 3. P. H693–H709. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00388.2018>
9. Boutouyrie P., Chowienczyk P., Humphrey J. D., Mitchell G. F. Arterial stiffness and cardiovascular risk in hypertension // *Circulation Research*. 2021. Vol. 128, № 7. P. 864–886. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.121.318061>
10. Regnault V., Lacolley P., Laurent S. Arterial stiffness: From basic primers to integrative Physiology // *Annual Review of Physiology*. 2024. Vol. 86. P. 99–121. <https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-042022-031925>
11. Spronck B. Stiff vessels approached in a flexible way: Advancing quantification and interpretation of arterial stiffness // *Artery Research*. 2018. Vol. 21. P. 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.artres.2017.11.006>
12. Рогаткин Д. А., Ивлиева А. Л., Штыфлюк М. Е. Совокупная оценка тонуса и реактивности микрососудистого русла по данным оптической флоуметрии *in vivo*. Обоснование подхода // *Медицинская физика*. 2024. № 3. С. 65–82. <https://doi.org/10.52775/1810-200X-2024-103-3-65-82>
13. Сагайдачный А. А. Окклюзионная проба: методы анализа, механизмы реакции, перспективы применения // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2018. Т. 17, № 3. С. 5–22. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2018-17-3-5-22>
14. Rosenberry R., Nelson M. D. Reactive hyperemia: A review of methods, mechanisms, and considerations // *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2020. Vol. 318, № 3. P. R605–R618. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00339.2019>
15. Philpott A., Anderson T. J. Reactive hyperemia and cardiovascular risk // *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*. 2007. Vol. 27, № 10. P. 2065–2067. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.107.149740>
16. Coccarelli A., Nelson M. D. Modeling reactive hyperemia to better understand and assess microvascular function: A review of techniques // *Annals of Biomedical Engineering*. 2023. Vol. 51, № 3. P. 479–492. <https://doi.org/10.1007/s10439-022-03134-5>
17. Laurent S., Agabiti-Rosei C., Bruno R. M., Rizzoni D. Microcirculation and macrocirculation in hypertension: A dangerous cross-link? // *Hypertension*. 2022. Vol. 79, № 3. P. 479–490. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.121.17962>
18. Федорович А. А., Королев А. И., Ососков В. С., Саматова К. С., Дранкина О. М. Новые тренды развития направления по неинвазивному исследованию микроциркуляции в коже человека. Описательный



- обзор // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2025. Т. 24, № 6. Статья 4412. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2025-4412>
19. Королев А. И., Ососков В. С., Федорович А. А., Чащин М. Г., Дадаева В. А., Стрелкова А. В., Омеляненко К. В., Михайлова М. А., Горшков А. Ю., Дранкина О. М. Структурно-функциональное состояние микроциркуляторного русла кожи у мужчин с различными фенотипами артериальной гипертензии низкого и умеренного сердечно-сосудистого риска // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2024. Т. 23, № 10. Статья 4133. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-4133>
20. Wielicka M., Neubauer-Geryk J., Kozera G., Bieniaszewski L. Clinical application of pulsatility index // Medical Research Journal. 2020. Vol. 5, № 3. P. 201–210. <https://doi.org/10.5603/MRJ.a2020.0016>
21. Dong Y., Wang W. P., Ignee A., Zuo D., Qiu Y. J., Zhang Q., Lu X. Y., Chen S., Dietrich C. F. The diagnostic value of Doppler Resistive Index in the differential diagnosis of focal liver lesions // Journal of Ultrasonography. 2023. Vol. 23, вып. 93. P. e45–e52. <https://doi.org/10.15557/JoU.2023.0010>
22. Wen W., Zhang Y., Jia G., Chi Y. Exploring coronary microvascular dysfunction from functional impairment and structural damage // Frontiers in Cardiovascular Medicine. 2026. Vol. 12. Art. 1600947. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1600947>
23. Damianaki A., Hendriks-Balk M., Brito W., Polychronopoulou E., Theiler K., Maillard M., Maurer J., Eugster P., Pruijm M., Wuerzner G. Contrast-enhanced ultrasonography reveals a lower cortical perfusion and a decreased renal flow reserve in hypertensive patients // Nephrology Dialysis Transplantation. 2024. Vol. 39, № 2. P. 242–250. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfad15>
24. Pijls N. H., Keulards D. C. J., Kakuta T., Amano T., Ando H., Tanaka N., Mahendiran T., Takumi T., Matsuo H., Keeble T. R., Damman P., Fearon W. F., Mizukami T., Tonino P. A. L., Alfonso F., De Bruyne B., Akasaka T. Absolute coronary blood flow measurement and the principle of microvascular resistance reserve // Cardiovascular Intervention and Therapeutics. 2026. Vol. 41. P. 305–320. <https://doi.org/10.1007/s12928-025-01211-9>
25. Li Z., Liu H., Li M., Liu S., Pan X., Zhao H., Xue Ch., Xu D. Effects of resistance exercise intensity on cerebral blood flow and cerebrovascular reactivity in healthy young males: A pilot study // Physiological Reports. 2025. Vol. 13, iss. 9. Art. e70361. <https://doi.org/10.14814/phy2.70361>
26. Скрипаль Ан. В., Фомин А. В., Бахметьев А. С., Брилёнок Н. Б., Сагайдачный А. А., Добдин С. Ю., Тихонова А. С. Диагностика артериальных сосудов спортсменов с помощью доплеровского ультразвукового измерения // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 141–148. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-141-148>
27. Савичева А. А., Бернс С. А., Исайкина О. Ю., Горшков А. Ю., Веремеев А. В., Дранкина О. М. Лабораторно-инструментальная диагностика функции эндотелия, отражающей сосудистую жесткость: настоящее и перспективы. Обзор литературы // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2025. Т. 24, № 6. С. 106–113. <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2025-4426>
28. Nohria A., Gerhard-Herman M., Creager M. A., Hurlley S., Mitra D., Ganz P. Role of nitric oxide in the regulation of digital pulse volume amplitude in humans // Journal of Applied Physiology. 2006. Vol. 101, iss. 2. P. 545–548. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01285.2005>
29. Thijssen D. H. J., Black M. A., Pyke K. E., Padilla J., Atkinson G., Harris R. A., Parker B., Widlansky M. E., Tschakovsky M. E., Green D. J. Assessment of flow-mediated dilation in humans: A methodological and physiological guideline // American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology. 2011. Vol. 300, iss. 1. P. H2–H12. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00471.2010>
30. Pradhan R. K. Effect of myogenic tone on agonist-mediated vasoconstriction in isolated arteries: A computational study // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2025. Vol. 258. Art. 108495. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108495>
31. Davis M. J., Earley S., Li Y. S., Chien S. Vascular Mechanotransduction // Physiological Reviews. 2023. Vol. 103, № 2. P. 1247–1421. <https://doi.org/10.1152/physrev.00053.2021>
32. Cui Y., Gollasch M., Kassmann M. Arterial myogenic response and aging // Ageing Research Reviews. 2023. Vol. 84. Art. 101813. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2022.101813>

References

- Litvitskiy P. F. Impairments of regional blood flow and microcirculation. *Regional Circulation and Microcirculation*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 82–92 (in Russian). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2020-19-1-82-92>
- Korolev A. I., Fedorovich A. A., Gorshkov A. Yu., Dранкина О. М. Skin microcirculation in essential arterial hypertension. *Regional Circulation and Microcirculation*, 2020, vol. 19, no. 2, pp. 4–10 (in Russian). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2020-19-2-4-10>
- Jackson W. F. Myogenic tone in peripheral resistance arteries and arterioles: The pressure is on! *Frontiers in Physiology*, 2021, vol. 12, art. 699517. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.699517>
- Fedorovich A. A., Gorieva Sh. B., Rogoza A. N., Chikhladze N. M. Functional state of arteriolar and venular skin microvessels in patients with hypertension. *Regional Circulation and Microcirculation*, 2014, vol. 13, no. 3, pp. 45–60 (in Russian). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2014-13-3-45-60>
- Mučka S., Miodońska M., Jakubiak G. K., Starzak M., Cieślak G., Stanek A. Endothelial function assessment by flow-mediated dilation method: A valuable tool in the evaluation of the cardiovascular system. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,



- 2022, vol. 19, iss. 18, art. 11242. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811242>
6. Levy B. I., Schiffrin E. L., Mourad J. J., Agostini D., Vicaud E., Safar M. E., Struijker-Boudier H. A. Impaired tissue perfusion: A pathology common to hypertension, obesity, and diabetes mellitus. *Circulation*, 2008, vol. 118, no. 9, pp. 968–976. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.763730>
 7. Giudici A., Wilkinson I. B., Khir A. W. Review of the techniques used for investigating the role elastin and collagen play in arterial wall mechanics. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2021, vol. 14, pp. 256–269. <https://doi.org/10.1109/RBME.2020.3005448>
 8. Reesink K. D., Spronck B. Constitutive interpretation of arterial stiffness in clinical studies: A methodological review. *American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology*, 2019, vol. 316, no. 3, pp. H693–H709. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00388.2018>
 9. Boutouyrie P., Chowienczyk P., Humphrey J. D., Mitchell G. F. Arterial stiffness and cardiovascular risk in hypertension. *Circulation Research*, 2021, vol. 128, no. 7, pp. 864–886. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.121.318061>
 10. Regnault V., Lacolley P., Laurent S. Arterial Stiffness: From Basic Primers to Integrative Physiology. *Annual Review of Physiology*, 2024, vol. 86, pp. 99–121. <https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-042022-031925>
 11. Spronck B. Stiff vessels approached in a flexible way: Advancing quantification and interpretation of arterial stiffness. *Artery Research*, 2018, vol. 21, pp. 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.artres.2017.11.006>
 12. Rogatkin D. A., Ivlieva A. L., Shtiflyuk M. E. Cumulative assessment of tone and reactivity of the microvascular bed based on *in vivo* optical flowmetry data. Justification of the approach. *Meditsinskaja fizika*, 2024, no. 3, pp. 65–82. (in Russian). <https://doi.org/10.52775/1810-200X-2024-103-3-65-82>
 13. Sagaidachnyi A. A. Occlusion test: Methods of analysis, reaction mechanisms, application prospects. *Regional Circulation and Microcirculation*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 5–22 (in Russian). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2018-17-3-5-22>
 14. Rosenberry R., Nelson M. D. Reactive hyperemia: A review of methods, mechanisms, and considerations. *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2020, vol. 318, no. 3, pp. R605–R618. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00339.2019>
 15. Philpott A., Anderson T. J. Reactive hyperemia and cardiovascular risk. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 2007, vol. 27, no. 10, pp. 2065–2067. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.107.149740>
 16. Coccarelli A., Nelson M. D. Modeling reactive hyperemia to better understand and assess microvascular function: A review of techniques. *Annals of Biomedical Engineering*, 2023, vol. 51, no. 3, pp. 479–492. <https://doi.org/10.1007/s10439-022-03134-5>
 17. Laurent S., Agabiti-Rosei C., Bruno R. M., Rizzoni D. Microcirculation and macrocirculation in hypertension: A dangerous cross-link? *Hypertension*, 2022, vol. 79, no. 3, pp. 479–490. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.121.17962>
 18. Fedorovich A. A., Korolev A. I., Ososkov V. S., Samatova K. S., Drapkina O. M. New trends in the development of noninvasive assessment of human skin microcirculation: A descriptive review. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 2025, vol. 24, no. 6, art. 4412 (in Russian). <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2025-4412>
 19. Korolev A. I., Ososkov V. S., Fedorovich A. A., Chashhin M. G., Dadaeva V. A., Strelkova A. V., Omel'janenko K. V., Mihajlova M. A., Gorshkov A. Yu., Drapkina O. M. Structural and functional state of the skin microcirculation in men with various phenotypes of arterial hypertension with low and moderate cardiovascular risk. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 2024, vol. 23, no. 10, art. 4133 (in Russian). <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2024-4133>
 20. Wielicka M., Neubauer-Geryk J., Kozera G., Bieniaszewski L. Clinical application of pulsatility index. *Medical Research Journal*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 201–210. <https://doi.org/10.5603/MRJ.a2020.0016>
 21. Dong Y., Wang W. P., Ignee A., Zuo D., Qiu Y. J., Zhang Q., Lu X. Y., Chen S., Dietrich C. F. The diagnostic value of Doppler Resistive Index in the differential diagnosis of focal liver lesions. *Journal of Ultrasonography*, 2023, vol. 23, iss. 93, pp. e45–e52. <https://doi.org/10.15557/JoU.2023.0010>
 22. Wen W., Zhang Y., Jia G., Chi Y. Exploring coronary microvascular dysfunction from functional impairment and structural damage. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 2026, vol. 12, art. 1600947. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1600947>
 23. Damianaki A., Hendriks-Balk M., Brito W., Polychronopoulou E., Theiler K., Maillard M., Maurer J., Eugster P., Pruijm M., Wuerzner G. Contrast-enhanced ultrasonography reveals a lower cortical perfusion and a decreased renal flow reserve in hypertensive patients. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 2024, vol. 39, no. 2, pp. 242–250. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfad158>
 24. Pijls N. H., Keulards D. C. J., Kakuta T., Amano T., Ando H., Tanaka N., Mahendiran T., Takumi T., Matsuo H., Keeble T. R., Damman P., Fearon W. F., Mizukami T., Tonino P. A. L., Alfonso F., De Bruyne B., Akasaka T. Absolute coronary blood flow measurement and the principle of microvascular resistance reserve. *Cardiovascular Intervention and Therapeutics*, 2026, vol. 41, pp. 305–320. <https://doi.org/10.1007/s12928-025-01211-9>
 25. Li Z., Liu H., Li M., Liu S., Pan X., Zhao H., Xue Ch., Xu D. Effects of resistance exercise intensity on cerebral blood flow and cerebrovascular reactivity in healthy young males: A pilot study. *Physiological Reports*, 2025, vol. 13, iss. 9, art. e70361. <https://doi.org/10.14814/phy2.70361>
 26. Skripal An. V., Fomin A. V., Bakhmetyev A. S., Brilenok N. B., Sagaidachnyi A. A., Dobdin S. Y., Tikhonova A. S. Diagnostics of arterial vessels of athletes using Doppler ultrasound measurement. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 2,



- pp. 141–148 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-141-148>
27. Savicheva A. A., Berns S. A., Isajkina O. Ju., Gorshkov A. Ju., Veremeev A. V., Drapkina O. M. Laboratory and instrumental assessment of endothelial function associated with vascular stiffness: Current status and future perspectives. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 2025, vol. 24, no. 6, pp. 106–113 (in Russian). <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2025-4426>
28. Nohria A., Gerhard-Herman M., Creager M. A., Hurlley S., Mitra D., Ganz P. Role of nitric oxide in the regulation of digital pulse volume amplitude in humans. *Journal of Applied Physiology*, 2006, vol. 101, iss. 2, pp. 545–548. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01285.2005>
29. Thijssen D. H. J., Black M. A., Pyke K. E., Padilla J., Atkinson G., Harris R. A., Parker B., Widlansky M. E., Tschakovsky M. E., Green D. J. Assessment of flow-mediated dilation in humans: A methodological and physiological guideline. *American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology*, 2011, vol. 300, iss. 1, pp. H2–H12. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00471.2010>
30. Pradhan R. K. Effect of myogenic tone on agonist-mediated vasoconstriction in isolated arteries: A computational study. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2025, vol. 258, art. 108495. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108495>
31. Davis M. J., Earley S., Li Y. S., Chien S. Vascular Mechanotransduction. *Physiological Reviews*, 2023, vol. 103, no. 2, pp. 1247–1421. <https://doi.org/10.1152/physrev.00053.2021>
32. Cui Y., Gollasch M., Kassmann M. Arterial myogenic response and aging. *Ageing Research Reviews*, 2023, vol. 84, art. 101813. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2022.101813>

Поступила в редакцию 31.03.2026; одобрена после рецензирования 17.04.2026; принята к публикации 27.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 31.03.2026; approved after reviewing 17.04.2026; accepted for publication 27.04.2026; published 30.06.2026



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 149–157

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 149–157

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-149-157>, EDN: MORDBK

Научная статья

УДК 577.35

Сравнение радиочувствительности клеток линии А549 при гамма-облучении на установке «Рокус-М» и канале № 3 реактора ИБР-2



А. В. Агапов, М. В. Булавин, В. Н. Гаевский, А. В. Галушко, М. Д. Индюкова,
Г. В. Мицын, А. В. Рзянина[✉], С. С. Углова, В. Р. Ямурзин

Объединенный институт ядерных исследований, Россия, 141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Агапов Алексей Валериевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора радиационной медицины и биологии научно экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, agapov@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4471-753X>, AuthorID: 1327003

Булавин Максим Викторович, кандидат физико-математических наук, заместитель главного инженера установки ИБР-2, Лаборатории нейтронной физики, bulavin85@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9729-3414>

Гаевский Виктор Николаевич, ведущий инженер сектора радиационной медицины и биологии научно экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, gaevsky@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1668-9206>, AuthorID: 1326558

Галушко Алексей Викторович, начальник группы Лаборатории нейтронной физики, galushko_av@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2754-0738>

Индюкова Мария Дмитриевна, инженер сектора дозиметрии и прикладных исследований научно экспериментального отдела новых ускорителей, отдела научно-исследовательских работ и инноваций Лаборатории ядерных проблем, mary110@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1462-5669>

Мицын Геннадий Валентинович, кандидат технических наук, начальник сектора радиационной медицины и биологии научно-экспериментальный отдел новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, mysin@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1201-159X>, AuthorID: 97171

Рзянина Анна Владимировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора радиационной медицины и биологии научно-экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, rzanina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5418-4642>, AuthorID: 97169

Углова Светлана Сергеевна, старший инженер сектора радиационной медицины и биологии научно экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, uglova@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4954-1156>, AuthorID: 1327100

Ямурзин Владик Рафикович, инженер Лаборатории нейтронной физики, yamurzin.v@nf.jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6212-8960>, AuthorID: 1327589

Аннотация. *Цели работы:* получение данных по выживаемости и образованию микроядер в клетках карциномы легкого А549 после воздействия наведенного γ -излучения на облучательной установке канала № 3 ИБР-2 (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна) при заглушенном реакторе; проведение сравнения результатов с аналогичными данными, полученными на γ -терапевтической установке «Рокус-М» с источником ^{60}Co . *Материалы и методы.* Клетки карциномы легкого человека А549 подвергались γ -облучению на установке «Рокус-М» и канале № 3 реактора ИБР-2 при заглушенном реакторе. Проведены измерения характеристик радиационного поля от наведенного γ -излучения и анализ выживаемости и образования микроядер в клетках карциномы легкого А549 в данных условиях. *Результаты.* Получены данные о характеристиках радиационного поля от наведенного γ -излучения облучательной установке канала № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе и степени его влияния на радиочувствительность клеток А549. Проведено сравнение выявленных показателей радиочувствительности с ранее полученными данными для γ -терапевтической установки «Рокус-М». *Выводы:* Канал № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе можно использовать как альтернативный источник γ -излучения для биофизических экспериментов, поскольку в экспериментах не обнаружено статистически значимых различий между частотой образования микроядер и выживаемостью клеток при облучении на установках «Рокус-М» и ИБР-2.

Ключевые слова: клетки карциномы легкого человека А549, радиочувствительность, микроядерный тест, γ -излучение

Благодарности: Авторы выражают благодарность М. О. Петровой (Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория нейтронной физики) за предоставленные данные, касающиеся плотности потока нейтронов.

Для цитирования: Агапов А. В., Булавин М. В., Гаевский В. Н., Галушко А. В., Индюкова М. Д., Мицын Г. В., Рзянина А. В., Углова С. С., Ямурзин В. Р. Сравнение радиочувствительности клеток линии А549 при гамма-облучении на установке «Рокус-М» и канале № 3 реактора ИБР-2 // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 149–157. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-149-157>, EDN: MORDBK

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



Article

Comparison of the radiosensitivity of A549 cells under gamma irradiation at the Rokus-M facility and at the channel No. 3 of the IBR-2 reactor

A. V. Agapov, M. V. Bulavin, V. N. Gayevsky, A. V. Galushko, M. D. Indyukova, G. V. Mytsin, A. V. Rzyanina[✉], S. S. Uglova, V. R. Yamurzin

Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie St., Dubna 141980, Russia

Alexey V. Agapov, agapov@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4471-753X>, AuthorID: 1327003

Maksim V. Bulavin, bulavin85@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9729-3414>

Viktor N. Gayevsky, gaevsky@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1668-9206>, AuthorID: 1326558

Alexey V. Galushko, galushko_av@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2754-0738>

Maria D. Indyukova, mary110@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1462-5669>

Gennady V. Mytsin, mytsin@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1201-159X>, AuthorID: 97171

Anna V. Rzyanina, rzjanina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5418-4642>, AuthorID: 97169

Svetlana S. Uglova, uglova@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4954-1156>, AuthorID: 1327100

Vladik R. Yamurzin, yamurzin.v@nf.jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6212-8960>, AuthorID: 1327589

Abstract. Background and Objectives: The objectives of the study were to obtain data on survival and micronuclei formation in A549 lung carcinoma cells after exposure to induced γ -radiation at the IBR-2 channel No. 3 irradiation facility (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna) with the reactor shut down and to compare the results with similar data obtained at the Rokus-M γ -therapeutic facility with a ^{60}Co source.

Materials and Methods: Human lung carcinoma A549 cells were exposed to γ -irradiation at the Rokus-M facility and channel No. 3 of the IBR-2 reactor with the reactor shut down. The radiation field characteristics from induced γ -radiation were measured, and survival and micronuclei formation in A549 lung carcinoma cells under these conditions were analyzed. **Results:** Data have been obtained on the characteristics of the radiation field from induced γ -radiation in the IBR-2 channel No. 3 irradiation unit with the reactor shut down and the extent of its influence on the radiosensitivity of A549 cells. A comparison of the identified radiosensitivity indices has been conducted with previously obtained data for the Rokus-M γ -therapeutic unit. **Conclusions:** Channel No. 3 of the IBR-2 with the reactor shut down can be used as an alternative γ -radiation source for biophysical experiments, since no statistically significant differences have been found between the frequency of micronuclei formation and cell survival during irradiation on the Rokus-M and IBR-2 units.

Keywords: radiosensitivity of human lung carcinoma cells A549, micronucleus test, gamma radiation

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Mariya O. Petrova (Joint Institute for Nuclear Research, Laboratory of Neutron Physics) for providing data on the neutron flux density.

For citation: Agapov A. V., Bulavin M. V., Gayevsky V. N., Galushko A. V., Indyukova M. D., Mytsin G. V., Rzyanina A. V., Uglova S. S., Yamurzin V. R. Comparison of the radiosensitivity of A549 cells under gamma irradiation at the Rokus-M facility and at the channel No. 3 of the IBR-2 reactor. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 149–157 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-149-157>, EDN: MORDBK

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

Введение

В экспериментальной радиобиологии особенно важна возможность иметь калиброванные источники ионизирующего излучения с определённой интенсивностью, низкой погрешностью и заранее известным значением относительной биологической эффективности (ОБЭ). Таковым является γ -излучение, которое на сегодняшний день служит эталоном при оценке ОБЭ излучений с различными значениями линейной передачи энергии (ЛПЭ). Для γ -излучения накоплено большое количество данных о связи радиобиологических эффектов и дозы излучения.

С целью поиска альтернативных установок «Рокус-М» с источником ^{60}Co (ЛЭМЗ «Равенство», г. Санкт-Петербург) иных источников γ -излучения нами проводились измерения характеристик радиационного поля от наведенного γ -излучения на облучательной установке кана-

ла № 3 ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ при заглушенном реакторе, а также и изучалась радиочувствительность клеток карциномы легкого человека А549 к этому излучению, в том числе в контексте сравнения с ранее полученными данными на установке «Рокус-М» с источником ^{60}Co .

1. Материалы и методы

1.1. γ -облучение на канале № 3 реактора ИБР-2

Схема канала № 3 реактора ИБР-2, в котором клетки подвергались воздействию γ -излучения, показана на рис. 1. Заштрихованные элементы на схеме являются биологической защитой от излучения [1].

В ближней к активной зоне стене защиты в направлении 3-го канала имеется отверстие прямоугольного сечения размерами 200 мм × 400 мм для вывода пучка нейтронов. Во второй стене

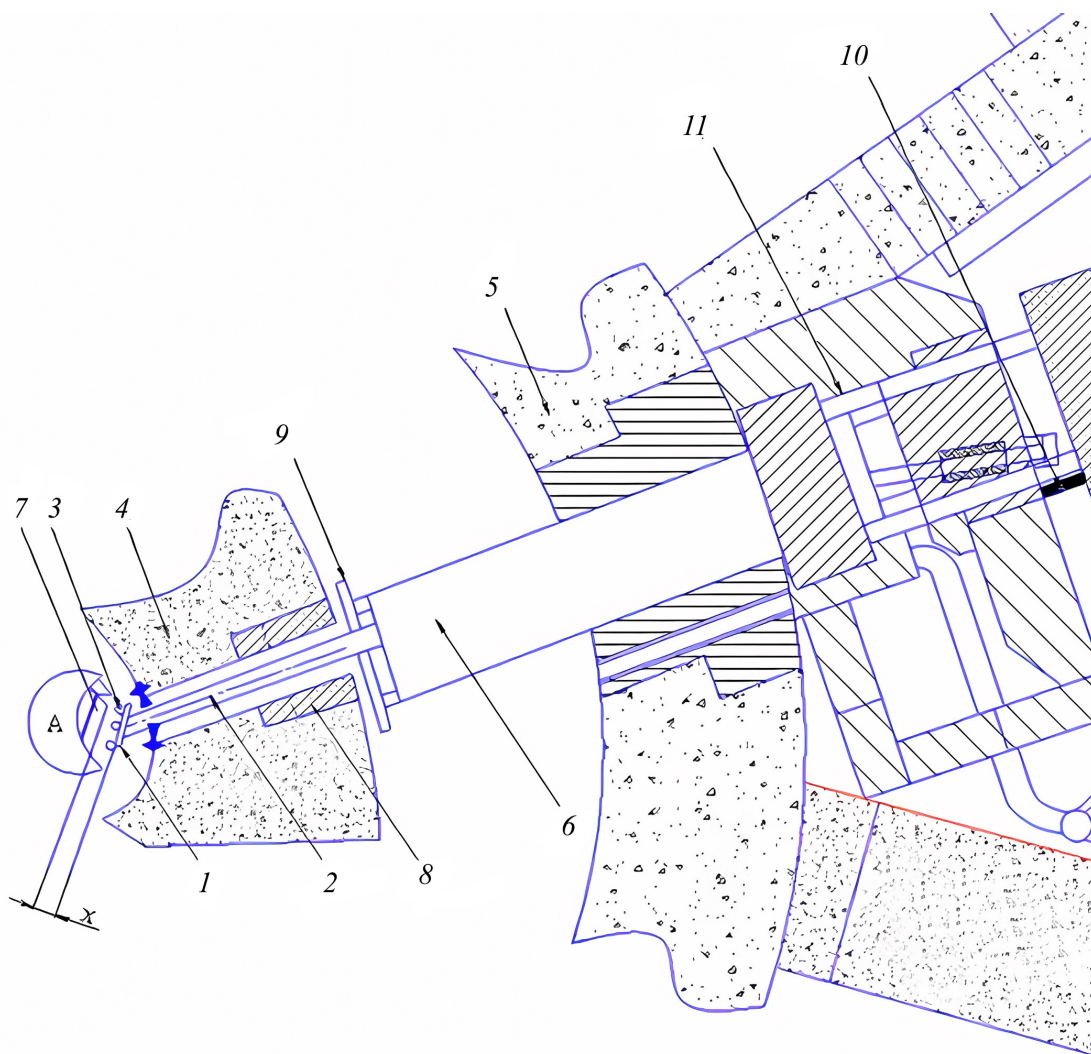


Рис. 1. Схема облучательной установки (в разрезе): А – активная зона реактора ИБР-2; 1 – стенд для облучения образцов и проведения дозиметрии; 2 – транспортный двутавр; 3 – образцы для облучения; 4 – первая биологическая защита; 5 – вторая биологическая защита; 6 – массивная часть облучательной установки; 7 – водяной замедлитель; 8 – шибер биологической защиты; 9, 10 – аварийные упоры, 11 – рельсовый путь. Заштрихованные элементы – биологическая защита от излучения [1]

Fig. 1. Layout of the irradiation unit: А – an active zone of the IBR-2 reactor; 1 – a stand for irradiating samples and conducting dosimetry; 2 – a transport H-beam; 3 – samples for irradiation; 4 – the first biological shielding; 5 – the second biological shielding; 6 – a massive part of the irradiation unit; 7 – a water moderator; 8 – the biological shielding gate; 9, 10 – emergency stops, 11 – the rail track. The shaded elements in the diagram are biological radiation shielding [1]

биологической защиты в зоне 3-го канала предусмотрено круглое отверстие диаметром 800 мм для ввода облучательной установки в кольцевой коридор.

Головная часть облучательной установки представляет собой горизонтально расположенный заполненный водой стальной цилиндрический бак диаметром 800 мм с закрепленным на ближнем к активной зоне торце транспортным двутавром шириной 100 мм, высотой 82 мм и длиной 2.7 м. Установка перемещается по рельсовому пути при помощи механизма

с электроприводом, что обеспечивает установку облучаемых образцов, закрепляемых на торце двутавра, на определенном расстоянии от водяной защиты реактора, которое выбирается в соответствие с требуемым интегральным флюенсом нейтронов (при активном реакторе) или гамма-квантов, но не ближе, чем 40 мм от поверхности замедлителя. Облучательная установка имеет биологическую защиту от ионизирующего излучения [1].

Непосредственным источником γ -излучения в данном исследовании в основном является ак-



тивированная в процессе работы реактора *стальная оболочка биологической защиты реактора*, при этом сам реактор был заглушен. К сожалению, непосредственно измерить энергетический спектр испускаемых квантов не представлялось возможным, поэтому эффективная энергия излучения была оценена по кривой ослабления дозы от толщины для различных веществ, о чем будет сказано далее.

Для измерения и контроля дозы во время облучения использовался клинический дозиметр PTW UNIDOS-E (PTW-Freiburg, Германия) [2] с плоскопараллельной ионизационной камерой Markus (PTW-Freiburg, Германия) [3], что позволяло измерять накопленную дозу или мощность дозы с погрешностью не хуже 5%. Для крепления камеры и облучаемых образцов на торце двутавра устанавливался стенд, изготовленный на 3D принтере из пластика ABS.

1.2. γ -облучение на установке «Рокус-М»

На установке «Рокус-М» клетки подвергались воздействию γ -излучения ^{60}Co со средней энергией квантов 1.25 МэВ и мощностью поглощенной дозы 0.48 Гр/мин. Процедура облучения проводилась при параметрах: расстояние источник – поверхность (РИП) 75 см, коллиматор 10×10 см. Поглощенную дозу измеряли тем же дозиметром при толщине замедлителя из оргстекла перед камерой, эквивалентной 4.5 мм воды в максимуме глубинно-дозового распределения. Ошибка в определении поглощенной дозы также не превышала 5%.

1.3. Клеточная культура

Клетки карциномы легкого человека линии A549 [4–6] (ООО «Биолот», г. С.-Петербург) культивировали либо в чашках Петри, либо в культуральных флаконах в зависимости от задачи эксперимента. Клетки инкубировали в стандартных условиях (37°C , 5% CO_2). Для культивирования использовалась питательная среда Игла MEM (НПП «ПанЭко», г. Москва) с добавлением 10% эмбриональной телячьей сыворотки (2 ммоль/л), раствора L-глутамин – пенициллина – стрептомицина, 50 ед./мл (НПП «ПанЭко», г. Москва).

1.4. Определение клоногенной выживаемости клеток

Клетки дважды промывали фосфатно-солевым буфером (ФСБ), снимали с культурального флакона с помощью раствора трипсин-

версена, ресуспендировали в эппендорфы и облучали γ -излучением в дозе 0, 0.5, 1, 2, 3 и 4.5 Гр на установках «Рокус-М» и канала № 3 ИБР-2 по показаниям клинического дозиметра. Затем клетки высевали в культуральные флаконы из расчета 50 клеток/мл среды. Клетки культивировали в стандартных условиях (среда Игла MEM с добавлением 10% эмбриональной телячьей сыворотки, 37°C , 5% CO_2) в течение времени, необходимого для формирования колоний. Далее клетки промывали ФСБ и окрашивали смесью метанола и кристаллического фиолетового в течение 30 мин при комнатной температуре. Для определения выживаемости клеток через 12–14 дней после посева подсчитывалось количество выросших колоний, где каждая колония считалась представляющей выжившую клетку, способную к пролиферации [7–9].

Эффективность посева (ЭП) определялась отношением числа выросших колоний к числу посеянных клеток:

$$\text{ЭП} = \frac{\text{Число выросших колоний}}{\text{Число посеянных клеток}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Показатель выживаемости (S-survival) определялся отношением ЭП облученных клеток к ЭП контрольных клеток:

$$S = \frac{\text{ЭП облученных клеток}}{\text{ЭП контрольных клеток}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

1.5. Микроядерный тест с блокированием цитокинеза

Микроядерный тест с блокированием цитокинеза является классическим методом оценки генотоксичности факторов окружающей среды (как химической, так и физической природы) и служит для выявления потенциально опасных генотоксических соединений.

Микроядра (МЯ) обнаруживаются в клетках на стадии интерфазы и представляют собой небольшого размера цитоплазматические тельца, содержащие часть хромосомы (центрические/ацентрические фрагменты) или целую хромосому, не способные интегрировать в дочерние ядра и расположенные в непосредственной близости от ядра клетки (или связанные с ним посредством хроматиновых мостиков). Частота образования микроядер позволяет количественно оценить цитогенетические нарушения, которые формируют микроядра, содержащие отставшие фрагменты хромосом или целые хромосомы [10–13].



Клетки карциномы легкого человека А549 выращивали на покровных стеклах в чашках Петри. При достижении клетками 70–80% моно-слоя клетки подвергались γ -облучению в дозе 0, 0.5, 1, 2 Гр на установках «Рокус-М» и канала № 3 ИБР-2. В течение 30 мин после облучения в питательную среду для блокировки цитокинеза добавляли цитохалазин В (3 мкл/мл). Клетки фиксировали через 24 ч после добавления цитохалазина В. Среду удаляли, дважды промывали ФСБ, фиксировали смесью метанол-уксусная кислота (3 : 1), промывали ФСБ, красили акридиновым оранжевым и вновь промывали ФСБ. Окрашенные стекла подсушивали и монтировали препараты на предметных стеклах. Микроядра считали только в бинуклеарных клетках. Для каждой дозы просчитывалось не менее 1000 бинуклеарных клеток, эксперименты проводились в трех повторах.

1.6. Статистический анализ

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы GraphPad Prism и Microsoft Excel. Количественные данные проверяли на нормальность распределения с использованием критерия Шапиро–Уилка. Для выявления статистических различий данных применяли критерий Стьюдента для независимых выборок. Данные представлены в виде средних значений как минимум трех экспериментов, выполненных в трех повторах, \pm стандартное отклонение. В качестве критического уровня значимости использовали значение $p < 0.05$.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Результаты измерения характеристик радиационного поля от наведенного γ -излучения

Одной из важных характеристик излучения является ослабление мощности дозы с увеличением расстояния от водяного замедлителя до торца двутавра, где фиксируется детектор (ионизационная камера дозиметра) и облучаемый образец. Результаты измерения этой зависимости представлены на рис. 2.

Из данных измерений следует, что эффективный фокус, т. е. точка, откуда выходит излучение (при условии его убывания обратно пропорционально квадрату расстояния), находится на глубине около 50–60 см от внешней поверхности водяной защиты. Это следует учитывать при облучении образцов значительной (более 10 см) протяженности.

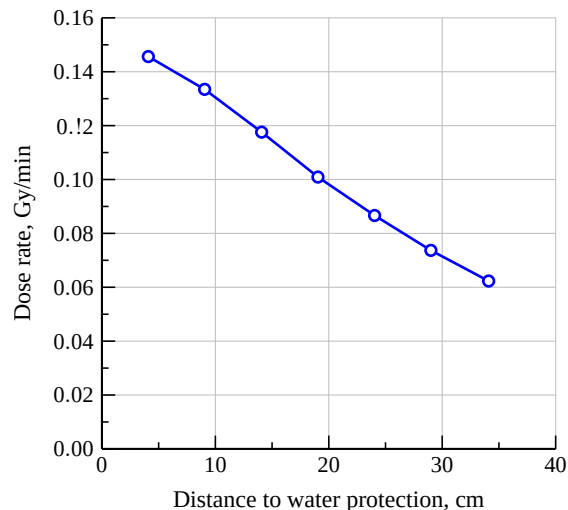


Рис. 2. Зависимость мощности дозы от расстояния между детектором и внешней поверхностью водяной защиты
Fig. 2. Dependence of the dose rate on the distance between the detector and the outer surface of the water shielding

Для оценки эффективной (средней) по спектру энергии γ -квантов были проведены измерения ослабления мощности дозы от толщины различных материалов, устанавливаемых перед детектором (сам детектор оставался на месте). Измерения были проведены для органического стекла, модельного воска и свинца. В качестве примера на рис. 3 приведена кривая ослабления мощности излучения для оргстекла РММА (polymethylmethacrylate, произведено в компании «Пласт.ру», г. Москва).

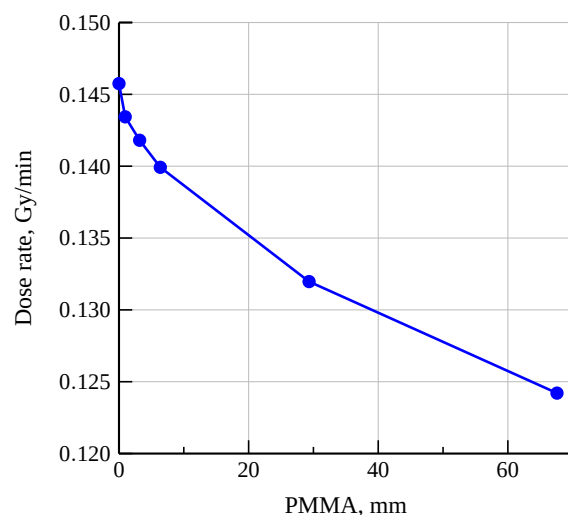


Рис. 3. Зависимость ослабления мощности дозы от толщины оргстекла РММА, устанавливаемого перед детектором

Fig. 3. Dependence of the dose rate attenuation on the thickness of the acrylic plastic PMMA installed in front of the detector



Из построенной кривой видно, что при малых толщинах заметный вклад в дозу вносит относительно низкоэнергетическая компонента излучения, которая резко убывает с толщиной замедлителя. Поэтому во всех последующих облучениях и измерениях перед детектором и образцом устанавливался замедлитель из оргстекла толщиной 1.5 см, который отсекал влияние этой «мягкой» компоненты.

Для того чтобы убедиться в том, что γ -кванты приходят в детектор именно напрямую со стороны водяной защиты, а не являются рассеянными в каких-то иных рядом расположенных конструкциях, детектор был окружен со всех сторон (кроме рабочей) листовым свинцом толщиной 2 мм. Показания детектора остались при этом неизменными в пределах погрешности измерений (около 3–5%).

Так как суммарный энергетический спектр излучения не известен, то методом Монте-Карло была произведена оценка некоторой эффективной или средней его энергии. В процессе симуляции энергия монохроматических γ -квантов подгонялась таким образом, чтобы значение половинного ослабления дозы максимально соответствовало измеренной для разных веществ величине. Были получены следующие значения: для свинца 4–5 МэВ, для оргстекла 7–8 МэВ, для воска 9–10 МэВ. Такой большой разброс полученных значений можно объяснить существенным отличием в величине эффективного заряда атомов вещества замедлителей, учитывая, по всей видимости, достаточно широкий энергетический спектр излучения.

Также было оценено среднее время периода полураспада излучающих изотопов, дающих вклад в общую дозу. Для этого измерения мощности дозы, осуществленные примерно в одинаковых условиях за 1.5 года, были аппроксимированы экспоненциальной зависимостью (рис. 4). В результате для среднего периода полураспада было получено значение, равное примерно 290 дней.

Несмотря на то, что реактор во время проведения экспериментов был заглушен, какой-то нейтронный фон в точке облучения все равно присутствовал. Для его измерения в позицию образца был установлен спутник НАА, а именно золотая фольга толщиной 50 нм. Интегральная плотность нейтронного потока составила около 10^2 нейтрон/(см²·с), что не может дать какого-либо заметного вклада в общую мощность дозы.

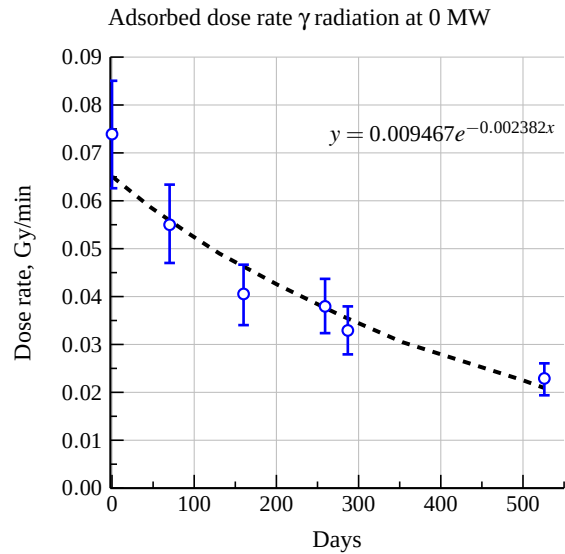


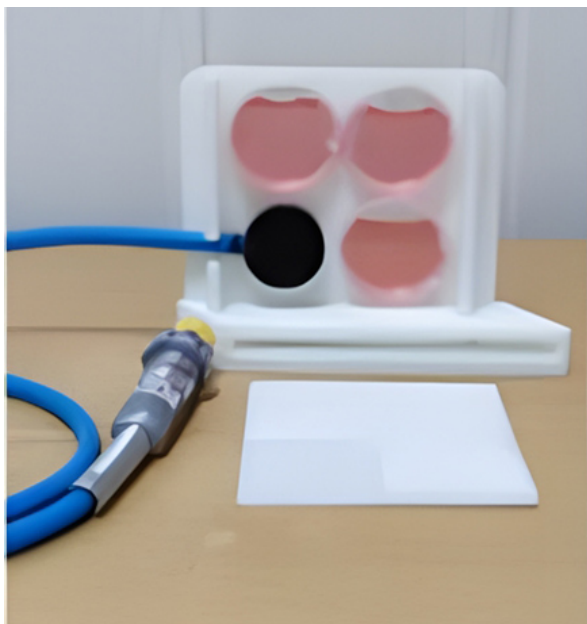
Рис. 4. Зависимость уменьшения мощности дозы от времени при заглушенном реакторе

Fig. 4. Dependence of the dose rate decrease on time when the reactor is shut down

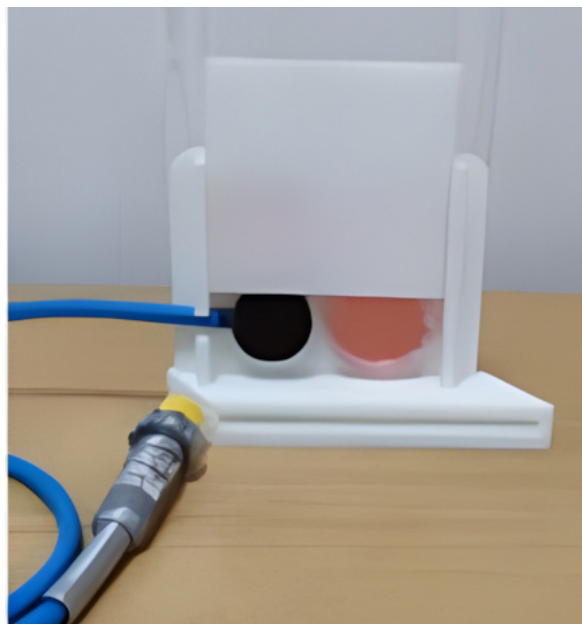
2.2. Исследование выживаемости и образования микроядер в клетках карциномы легкого A549

Для проведения эксперимента по исследованию выживаемости и образования микроядер в клетках карциномы легкого A549 после воздействия наведенного γ -излучения на облучательной установке канала № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе был разработан и изготовлен на 3D принтере стенд для установки и облучения образцов, а также крепления детектора дозиметра (рис. 5). Стенд состоит из держателя с отверстиями для трех образцов лабораторной посуды и «гнезда» для детектора. На время облучения образцы с детектором закрываются задвигающейся крышкой, что позволяет избежать случайного их выпадения из держателя. Со стороны облучения установлена пластина из оргстекла, поглощающая мягкую компоненту излучения.

Процесс монтажа стенда на облучательной установке канала № 3 реактора ИБР-2 показан на рис. 6. На рис. 7 представлены результаты измерения выживаемости клеток A549 в зависимости от дозы γ -излучения. Кривая выживаемости, выявленная на облучательной установке канала № 3 ИБР-2, близка по своим значениям к кривой, полученной ранее на γ -установке «Рокус-М». Не обнаружено статистически значимых различий между наклонами кривых выживаемости, полученных на двух установках (p -value = 0.720, при критическом уровне значимости $p < 0.05$).



а/а



б/б

Рис. 5. Стенд для облучения образцов и проведения дозиметрии (цвет онлайн)

Fig. 5. Stand for irradiation of samples and dosimetry (color online)



Рис. 6. Монтрование стенда для облучения на установке канала № 3 реактора ИБР-2 (цвет онлайн)

Fig. 6. Mounting of the irradiation stand at the installation of channel № 3 of the IBR-2 reactor (color online)

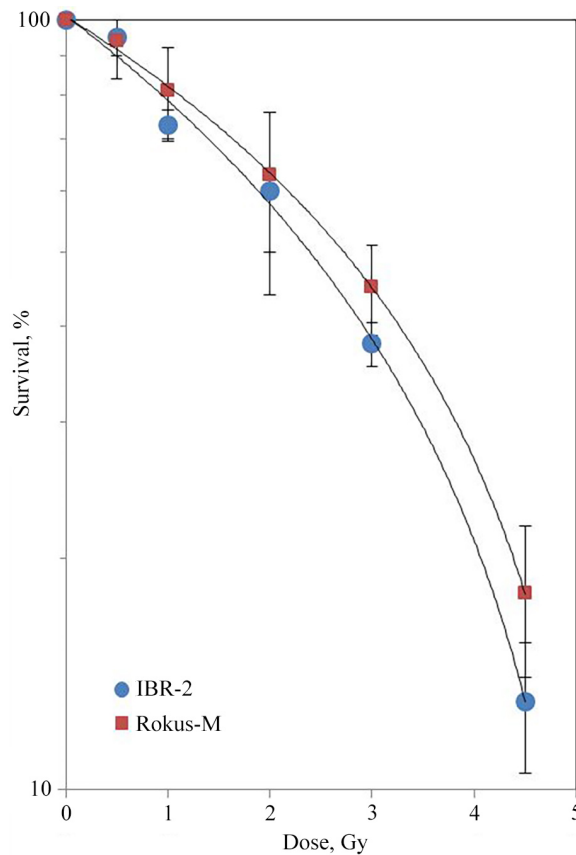


Рис. 7. Выживаемость клеток А549 в зависимости от дозы γ -излучения, измеренная на двух установках (цвет онлайн)

Fig. 7. Survival rate of A549 cells depending on the dose of gamma radiation, measured on the two facilities (color online)



Аналогичная тенденция наблюдалась для процесса образования микроядер в клетках A549 после облучения. Частота образования микроядер при облучении на ИБР-2 несколько выше, чем при облучении на установке «Рокус-М» (рис. 8). Однако не было выявлено статистически значимых различий между частотой образования микроядер при облучении на установках «Рокус-М» и ИБР-2 (p -value = 0.948 при критическом уровне значимости $p < 0.05$).

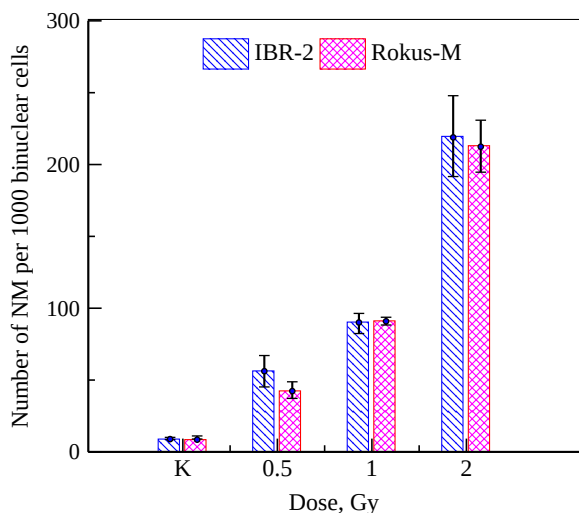


Рис. 8. Частота образования микроядер в клетках A549 в зависимости от дозы γ -излучения, измеренная на двух установках

Fig. 8. The frequency of micronucleus formation in A549 cells as a function of the gamma radiation dose, measured on the two facilities

Выводы

Представлены результаты исследования радиочувствительности клеток A549 на облучательной установке канала № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе и их сравнения с ранее полученными данными для γ -терапевтической установки «Рокус-М». Оценена клоногенная выживаемость и проведён микроядерный тест с блокированием цитокинеза на клетках линии A549. В результате проведенных экспериментов не обнаружено статистически значимых различий между частотой образования микроядер (p -value = 0.948) и выживаемостью клеток (p -value = 0.720) при облучении на установках «Рокус-М» и ИБР-2 при критическом уровне значимости $p < 0.05$. Таким образом, канал № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе можно использовать как альтернативный источник γ -излучения для биофизических экспериментов.

Как уже говорилось, данные эксперименты проводились в основном с целью поиска альтернативных установке «Рокус-М» источников γ -излучения. Для биофизических исследований немаловажными факторами являются время и условия проведения эксперимента. При планировании экспериментов для облучения на канале № 3 реактора ИБР-2 следует учитывать, что время подготовки (установка образца, коммуникация с инженерным персоналом, доставка образца до точки облучения) составляет около 20–30 минут на одно облучение, что не совсем удобно при работе с клеточными культурами. Тем не менее, при этом имеется возможность облучать относительно большие биологические объекты, например лабораторных животных, растения, когда однородность дозы по объему не является определяющим фактором.

Список литературы / References

1. Shabalin E. P., Verkhoglyadov A. E., Bulavin M. V., Rogov A. D., Kulagin E. N., Kulikov S. A. Spectrum and density of neutron flux in the irradiation beam line no. 3 of the IBR-2 reactor. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, 2015, vol. 12, pp. 336–343. <https://doi.org/10.1134/S154747711502020X>
2. *PTW Dosimetry Company*. Available at: <https://www.ptwdosimetry.com> (accessed February 12, 2026).
3. *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. Technical Reports Series No. 398*. Vienna, IAEA, 2000. 229 p.
4. Foster K. A., Oster C. G., Mayer M. M., Avery M. L., Audus K. L. Characterization of the A549 cell line as a type II pulmonary epithelial cell model for drug metabolism. *Experimental Cell Research*, 1998, vol. 243, iss. 2, pp. 359–366. <https://doi.org/10.1006/excr.1998.4172>
5. Giard D. J., Aaronson S. A., Todaro G. J., Arnstein P., Kersey J. H., Dosik H., Parks W. P. *In vitro* cultivation of human tumors: Establishment of cell lines derived from a series of solid tumors. *Journal of the National Cancer Institute*, 1973, vol. 51, no. 5, pp. 1417–1423. <https://doi.org/10.1093/jnci/51.5.1417>
6. Moreira A. S., Silva A. C., Sousa M. F. Q., Whirterc A. H., Ahlenc G., Lundgren M., Coroadinha A. S., Alves P. M., Peixoto C., Carrondo M. J. T. Establishing suspension cell cultures for improved manufacturing of oncolytic adenovirus. *Biotechnology Journal*, 2020, vol. 15, no. 4, art. 1900411. <https://doi.org/10.1002/biot.201900411>
7. Puck T. T., Marcus P. I. Action of x-rays on mammalian cells. *J. Exp. Med.*, 1956, vol. 103, no. 5, pp. 653–666. <https://doi.org/10.1084/jem.103.5.653>
8. Buch K., Peters T., Nawroth T., Sanger M., Schmidberger H., Langguth P. Determination of cell survival after irradiation via clonogenic assay versus multiple



- MTT Assay – A comparative study. *Radiation Oncology*, 2012, vol. 7, art. 1. <https://doi.org/10.1186/1748-717X-7-1>
9. Oike T., Hirota Yu., Darwis N. D. M., Shibata A., Ohno T. Comparison of clonogenic survival data obtained by pre- and post-irradiation methods. *J. Pers. Med.*, 2020, vol. 10, iss. 4, art. 171. <https://doi.org/10.3390/jpm10040171>
 10. Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay. *Nature Protocols*, 2007, vol. 2, no. 5, pp. 1084–1104. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.77>
 11. Zvereva D. E. Application of micronucleus test for evaluation of genotoxic properties of drugs. *Vestnik soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoy oblasti*, 2019, vol. 1, no. 2 (25), pp. 10–20 (in Russian). EDN: BTGCFM
 12. Vral A., Fenech M., Thierens H. The micronucleus assay as a biological dosimeter of *in vivo* ionising radiation exposure. *Mutagenesis*, 2011, vol. 26, iss. 1, pp. 11–17. <https://doi.org/10.1093/mutage/geq078>
 13. Ryabchenko N. I., Antoshchina M. M., Nasonova V. A., Fesenko E. V. Analysis of chromosome aberrations and micronucleus in the descendants of chinese hamster cells, irradiated at various doses and intensities of γ -radiation. *Radiatsiya i risk (Byulleten' Natsional'nogo radiatsionno-epidemiologicheskogo registra* [Radiation and Risk (Bulletin of the National radiation-epidemiological registry)], 2006, vol. 15, no. 1–2, pp. 114–120 (in Russian).

Поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 11.03.2026; принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 11.03.2026; accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 158–164

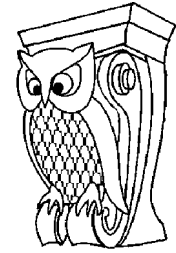
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 158–164

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-158-164>, EDN: OBUSIC

Научная статья

УДК 618.3-06,618.4-72



Ультразвуковая диагностика гипоксии плода

И. А. Салов¹, Ан. В. Скрипаль^{2✉}, М. В. Ломовицкая¹, Е. Ю. Жильнио¹, К. В. Машков²

¹Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского Министерства здравоохранения Российской Федерации, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

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

Салов Игорь Аркадьевич, доктор медицинских наук, заведующий кафедрой акушерства и гинекологии, salov.i.a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7285-5639>, AuthorID: 428263

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

Ломовицкая Марина Владимировна, ассистент кафедры акушерства и гинекологии, mkletcova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4036-6162>

Жильнио Екатерина Юрьевна, ассистент кафедры акушерства и гинекологии, zhilnio1@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3474-2948>, AuthorID: 1341213

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

Аннотация. Целью данного исследования явилась разработка и клиническая апробация неинвазивного метода диагностики гипоксии плода на основе анализа ультразвуковых изображений амниотической жидкости. В исследование были включены 30 беременных женщин, у которых во время родов проводился сбор околоплодных вод. С помощью ультразвукового сканера осуществлялась визуализация области, содержащей амниотическую жидкость, с последующим цифровым анализом интенсивности отражённого сигнала. Полученные изображения обрабатывались в 8-битной шкале серого для расчёта среднего значения интенсивности пикселей в зоне интереса. Установлена достоверная корреляция между степенью отражения ультразвуковой волны и содержанием мекония, что позволило дифференцировать степень тяжести гипоксии плода: значения интенсивности до 50 соответствовали норме, 50–80 – гипоксии средней степени, свыше 80 – выраженной гипоксии. Результаты подтверждены данными спектрофотометрического анализа амниотических вод *in vitro* и сопоставлены с клиническими проявлениями. Предложенный метод является безопасным, доступным, неинвазивным и перспективным для внедрения в практику антенатального наблюдения, в том числе в амбулаторных условиях.

Ключевые слова: гипоксия плода, амниотическая жидкость, ультразвуковая диагностика, меконий, антенатальное наблюдение, беременность

Для цитирования: Салов И. А., Скрипаль Ан. В., Ломовицкая М. В., Жильнио Е. Ю., Машков К. В. Ультразвуковая диагностика гипоксии плода // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 158–164. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-158-164>, EDN: OBUSIC

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

Article

Ultrasonographic evaluation of fetal hypoxia

I. A. Salov¹, An. V. Skripal^{2✉}, M. V. Lomovitskaia¹, E. Yu. Zhilnio¹, K. V. Mashkov²

¹V. I. Razumovsky Saratov State Medical University, 112 Bolshaya Kazachya St., Saratov 410012, Russia

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

Igor A. Salov, salov.i.a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7285-5639>, AuthorID: 428263

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

Marina V. Lomovitskaya, mkletcova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4036-6162>

Ekaterina Yu. Zhilnio, zhilnio1@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3474-2948>, AuthorID: 1341213

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

Abstract. Background and Objectives: Fetal hypoxia is a common and dangerous complication of pregnancy, associated with central nervous system damage, multi-organ dysfunction, and perinatal mortality. The release of meconium into amniotic fluid serves as a marker of intrauterine hypoxia and a risk factor for meconium aspiration syndrome. Existing diagnostic methods, such as amniocentesis and amnioscopy, are invasive and not suitable for routine practice. Therefore, the objective of this study was to develop and validate a noninvasive ultrasound-based method for early diagnosis of fetal hypoxia through the assessment of amniotic fluid characteristics. **Materials and Methods:** The study included 30 pregnant



women who delivered at the Yury Ya. Gordeev First City Clinical Hospital. All participants provided informed consent; the protocol was approved by the local ethics committee. Ultrasound scans of the amniotic fluid were obtained using the Accuvix XG (Samsung Medison) system. Images were processed with custom software developed in Python (certificate of state registration No. 2024614541). The algorithm calculated the mean pixel intensity in the selected amniotic fluid area, with values ranging from 0 (black, maximum ultrasound transmission) to 255 (white, maximum reflection). Calibration curves were built from *in vitro* spectral analysis of amniotic fluid with varying meconium content. Diagnostic thresholds were established: intensity <50 indicated absence of hypoxia, 50–80 corresponded to moderate hypoxia, and >80 to severe hypoxia. **Results:** The method has demonstrated a strong correlation between the ultrasound pixel intensity, amniotic fluid echogenicity, and meconium concentration. It has allowed a reliable differentiation between normal, moderate, and severe hypoxia. Unlike invasive techniques, this approach is simple, repeatable, and safe, suitable for both inpatient and outpatient antenatal monitoring. **Conclusion:** A noninvasive ultrasound method for assessing fetal hypoxia has been developed and clinically tested. It provides objective criteria for detecting meconium in amniotic fluid and grading hypoxia severity. The technique is safe, accessible, and has potential for broad clinical use, supporting timely interventions to improve perinatal outcomes. Further validation in larger cohorts is needed.

Keywords: fetal hypoxia, amniotic fluid, ultrasound diagnostics, meconium, antenatal monitoring, pregnancy

For citation: Salov I. A., Skripal An. V., Lomovitskaia M. V., Zhilnio E. Yu., Mashkov K. V. Ultrasonographic evaluation of fetal hypoxia. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 158–164 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-158-164>, EDN: OBUSIC

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

Введение

Гипоксические состояния плода представляют собой одно из осложнений беременности и родов, сопровождающееся высоким риском тяжёлых поражений центральной нервной системы и других жизненно важных органов, что нередко приводит к перинатальным потерям. Нарушение транспорта кислорода к тканям плода может возникать на различных этапах внутриутробного развития, что требует своевременной диагностики и проведения адекватных лечебно-профилактических мероприятий.

Современные исследования показывают, что пренатальная гипоксия, особенно возникающая в критические периоды органогенеза, значительно повышает риск мертворождения, а также ассоциирована с долговременными последствиями для здоровья, включая сердечно-сосудистые и метаболические нарушения в последующей жизни [1–3].

В исследовании [4] показано, что внутриутробная гипоксия негативно влияет на адаптационный потенциал и нейропластичность развивающегося мозга. Это связано с нарушением процессов формирования межклеточных связей и передачи нейронных импульсов, особенно выраженным в коре больших полушарий и гиппокампе. При внутриутробной гипоксии (или других стрессовых состояниях – при инфекции, компрессии пуповины и др.) у плода активируются перистальтика кишечника и расслабляется анальный сфинктер – он выделяет меконий в плодные воды, что имеет крайне негативные последствия [5–7].

Меконий (собирательное понятие) представляет собой первородный кал плода, включающий

слизь, желчные пигменты, эпителиальные клетки и другие компоненты, накапливающиеся в толстой кишке. При его выделении амниотическая жидкость приобретает характерную зелёную или жёлто-бурую окраску. По данным отечественных исследований [8], частота отхождения мекония в амниотическую жидкость варьируется от 4.5 до 20% и в среднем наблюдается примерно в 10% родов при головном предлежании плода, даже при соблюдении оптимальной акушерской тактики. Разброс в показателях объясняется различиями в характеристиках обследуемых популяций беременных и рожениц, а также неоднородностью клинических условий.

В настоящее время для диагностики гипоксии плода путём оценки цвета околоплодных вод используются методы прямой визуализации амниотической жидкости, такие как амниотомия, амниоцентез и амниоскопия, а также анализ биохимического состава околоплодных вод [9]. Однако эти методы являются инвазивными и обладают ограниченной клинической применимостью из-за риска осложнений и необходимости специального оборудования.

С учетом изложенного, была сформулирована цель настоящего исследования: разработка и клиническое обоснование метода ранней диагностики степени тяжести гипоксии плода на основе ультразвуковой оценки характеристик амниотической жидкости на различных сроках гестации.

Материалы и методы

К медицинским наблюдениям были привлечены 30 беременных женщин, у которых во время



родов собирались околоплодные воды. Все пациентки подписали информированное согласие на участие в исследовании, которое проводилось в соответствии с основными положениями Хельсинкской декларации.

Метод определения гипоксии плода включает получение ультразвукового изображения амниотической жидкости беременной женщины. Исследование проводилось с использованием ультразвукового сканера Accuvix XG (Samsung Medison) в зоне расположения амниотической жидкости.

Полученные изображения обрабатывались специализированной программой на языке Python (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614541). Программа выполняла усреднение интенсивности пикселей на выделенном участке изображения, соответствующем амниотической жидкости. Интенсивность пикселей представлялась в стандартной 8-битной шкале градации серого, значения которой варьируются от 0 (чёрный пиксель) до 255 (белый пиксель). Нулевому значению интенсивности соответствует максимальное пропускание ультразвуковой волны объектом, тогда как значению 255 – максимальное отражение ультразвука.

Среднее значение интенсивности пикселей на выделенной области сравнивалось с калибровочной зависимостью, построенной на основе спектральных данных амниотической жидкости, полученных *in vitro*. Калибровка проводилась путём определения коэффициента поглощения света в диапазоне длин волн 190–1100 нм и построения зависимости интенсивности отражённой ультразвуковой волны от среднего значения поглощения света с учётом клинических данных о содержании мекония в амниотической жидкости. В качестве эталона использовалась дистиллированная вода, спектр поглощения которой в указанном диапазоне условно был принят за нулевой.

Меконий рассматривается как маркер гипоксии плода и служит прогностическим фактором развития тяжёлого осложнения – синдрома аспирации мекония. Степень содержания мекония в амниотической жидкости классифицируется следующим образом: «прозрачная» и «молочная» жидкости не содержат меконий и не связаны с гипоксией плода; «зелёная» амниотическая жидкость свидетельствует о наличии мекония и соответствует гипоксии средней степени тяжести;

«тёмно-зелёная» жидкость содержит высокое количество мекония и ассоциируется с тяжёлой степенью гипоксии плода.

Результаты исследования

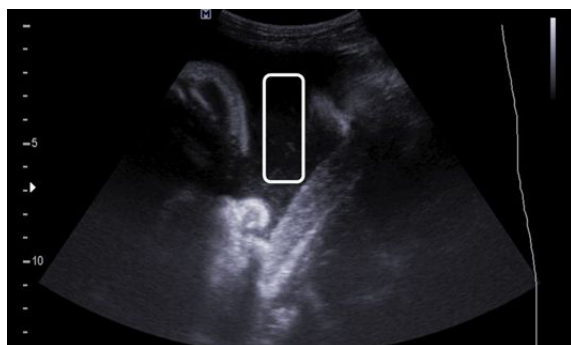
На рис. 1 представлены ультразвуковые изображения плодного яйца у трёх пациенток (А, Б и В). Анализ изображений проводился с применением количественной оценки эхогенности, основанной на измерении средней интенсивности сигнала в пределах заданной области интереса.

У пациентки А среднее значение интенсивности в исследуемой зоне составило 12 условных единиц по шкале серого, что свидетельствует о низком уровне эхогенности структуры. В случае пациентки Б аналогичный показатель достигал 67 ед. отражая умеренную эхогенность тканей в пределах анализируемой области. У пациентки В зарегистрировано наибольшее значение – 87 ед., что указывает на повышенную эхогенность.

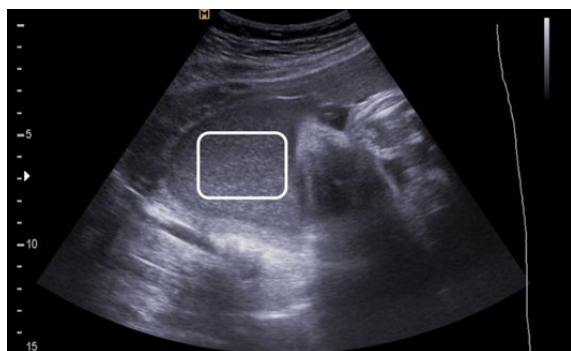
На рис. 2 представлены образцы амниотической жидкости трёх типов, соответствующие данным ультразвуковой визуализации (см. рис. 1). Образцы были получены интранатально (в процессе родов) и подвергнуты сканированию *in vitro*. Выделены три основные категории амниотической жидкости по цветовым и физико-химическим признакам: прозрачная (светлая), зелёная и тёмно-зелёная (желтовато-бурая), отражающие различную степень изменения её состава.

На рис. 2, а – цветное изображение амниотической жидкости пациентки А. В соответствии с клинической классификацией данный образец отнесён к категории «прозрачной» амниотической жидкости. Рис. 2, б иллюстрирует образец амниотической жидкости пациентки Б, характеризующийся зелёным окрашиванием. Согласно клиническим данным, данный тип классифицируется как «зелёный», что может быть ассоциировано с наличием мекония. На рис. 2, в представлено изображение амниотической жидкости пациентки В, относящейся к категории «тёмно-зелёная». Данный тип характеризуется более интенсивной окраской и высокой степенью мутности, что, в соответствии с клиническими наблюдениями, может свидетельствовать о значительном содержании мекония и потенциально более выраженных патологических изменениях внутриутробной среды.

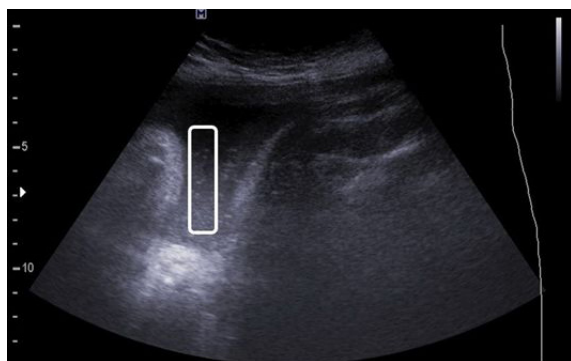
Рис. 3 иллюстрирует спектры поглощения различных типов амниотической жидкости (см. рис. 2). Диапазон длин волн 650–1100 нм



a/a



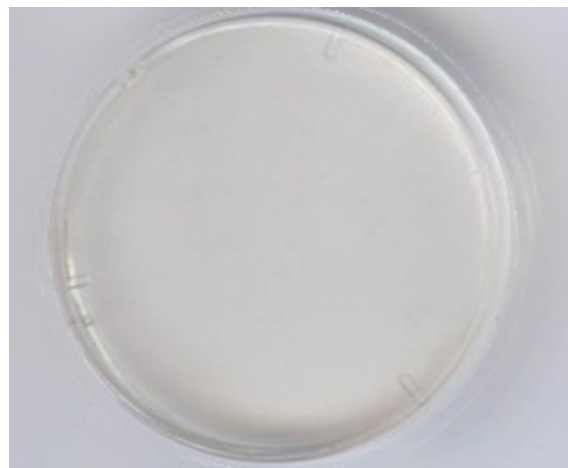
б/б



в/с

Рис. 1. Ультразвуковые изображения плодного яйца во II триместре беременности с выделенной зоной интереса амниотической жидкости (околоплодных вод): а – нормальные прозрачные (светлые) околоплодные воды (без взвесей) пациентки А; б – светло-зелёные околоплодные воды (эхогенная взвесь) пациентки Б; в – тёмно-зелёные (жёлто-коричневые) околоплодные воды (густая эхогенная взвесь) пациентки В. Зона интереса выделена контурным прямоугольником

Fig. 1. Ultrasound images of the gestational sac in the II trimester of pregnancy with the region of interest of the amniotic fluid highlighted: a – normal clear (anechoic) amniotic fluid (no suspended particles) of patient A; b – light green amniotic fluid (echogenic suspension) of patient B; c – dark green (yellow-brown) amniotic fluid (dense echogenic suspension) of patient C. The area of interest is highlighted by a contoured rectangle



a/a



б/б



в/с

Рис. 2. Образцы амниотической жидкости трёх типов, исследованные *in vitro* в чашках Петри: а – нормальная амниотическая жидкость; б – амниотическая жидкость светло-зелёного оттенка; в – амниотическая жидкость тёмно-зелёного (жёлто-коричневого) цвета (цвет онлайн)

Fig. 2. Amniotic fluid samples of three types examined *in vitro* in Petri dishes: a – normal amniotic fluid of patient A; b – light green amniotic fluid of patient B; c – dark green (yellow-brown) amniotic fluid of patient C (color online)



был выбран в качестве порогового при построении калибровочной кривой, поскольку именно в этом спектральном интервале наблюдалось наибольшее поглощение излучения образцами амниотической жидкости от пациенток с повышенным содержанием мекония.

Представленные данные демонстрируют зависимость между цветовой характеристикой амниотической жидкости и коэффициентом её оптического поглощения. По мере усиления окраски жидкости в более тёмные тона наблюдается статистически значимое увеличение коэффициента поглощения, что обусловлено ростом концентрации мекония в околоплодных водах. Эти результаты подтверждают возможность количественной оценки степени окрашивания жидкости как непрямого маркера гипоксического состояния плода. В таблице данные о типе вод и степени тяжести заболевания сопоставляются со значениями интенсивности УЗИ и коэффициентов поглощения в диапазоне 650–1100 нм.

На основе полученных данных 30 пациенток построена калибровочная линия (рис. 4), основанная на спектральных характеристиках образцов амниотической жидкости, полученных *in vitro*. Калибровочная линия построена по усреднённым значениям коэффициента поглощения света в диапазоне длин волн 650–1100 нм, при этом усреднение проводилось по 900 спектральным точкам.

На рис. 4 точка, отвечающая пациентке А, располагается в области, характерной для прозрачной амниотической жидкости. Точка, соответствующая пациентке Б, находится в зоне зелёной амниотической жидкости. Точка пациентки В принадлежит области, характерной для тёмно-зелёной амниотической жидкости.

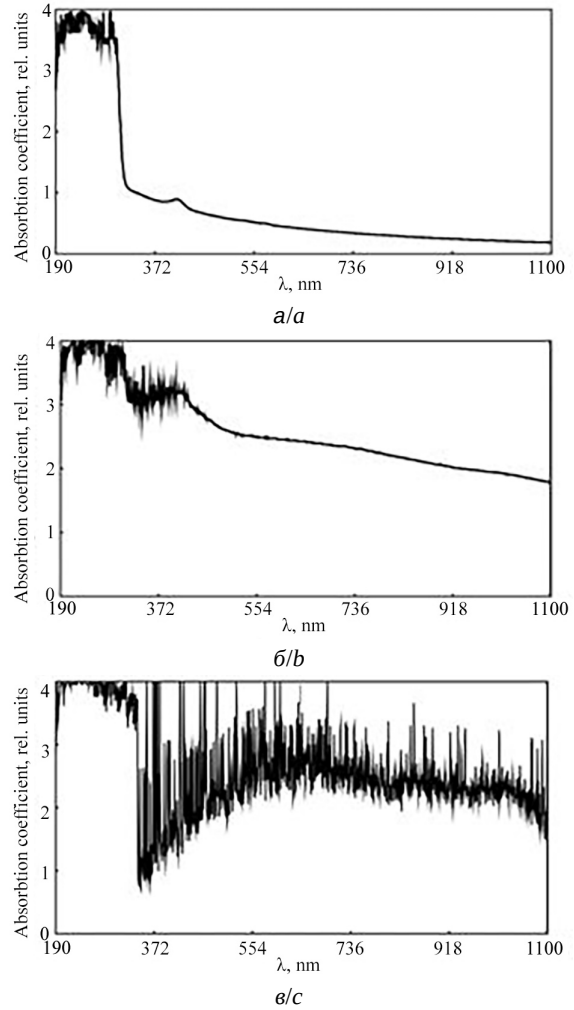


Рис. 3. Спектры поглощения амниотической жидкости: нормальной (а), светло-зелёного оттенка (б); тёмно-зелёного (жёлто-коричневого) оттенка (в)

Fig. 3. Absorption spectra of amniotic fluid samples: a – normal amniotic fluid of patient A; b – light green amniotic fluid of patient B; c – dark green (yellow-brown) amniotic fluid of patient C

Значения интенсивности УЗИ и коэффициентов поглощения в волновом диапазоне 650–1100 нм, усредненные для группы из 30 пациенток в зависимости от типа вод и степени тяжести заболевания

Ultrasound intensity and absorption coefficient values in the wave range of 650–1100 nm, averaged for a group of 30 patients depending on the type of amniotic fluid and the severity of the disease

Тип вод и степень тяжести заболевания / Type of waters and the severity of the disease	Значения интенсивности УЗИ (8-битная шкала серого) / Ultrasound intensity values, in 8-bit gray scale values	Коэффициент поглощения в диапазоне 650–1100 нм / Absorption coefficient in the range of 650–1100 nm
I – «прозрачная» и «молочная», отсутствие гипоксии плода / I – “transparent” and “milky”, absence of fetal hypoxia	0–50	0.1–1.05
II – «зеленая», средняя степень тяжести гипоксии / II – “green”, moderate severity of hypoxia	50–80	1.05–2.1
III – «темно-зеленая», высокая степень тяжести гипоксии / III – “dark green”, high severity of hypoxia	80–100	2.1–3.5

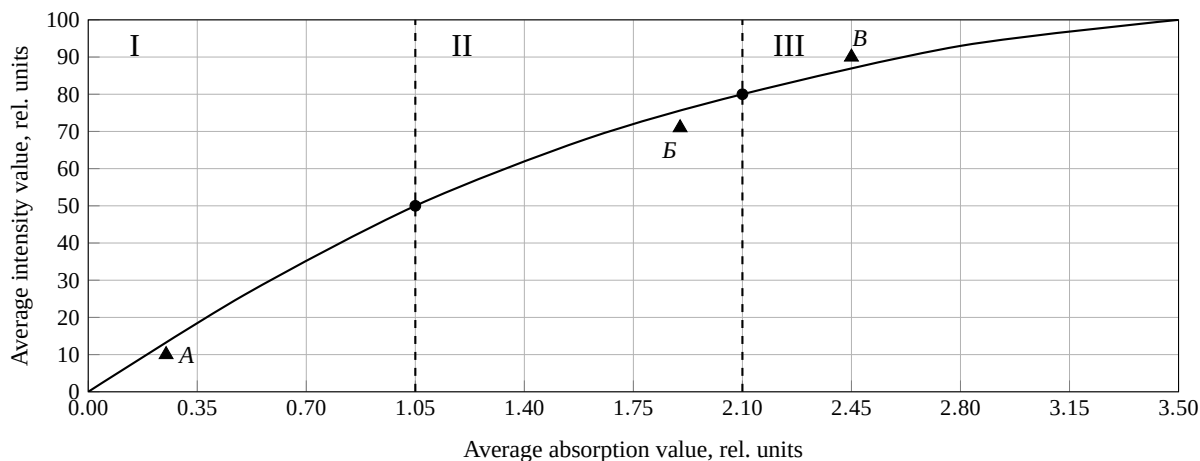


Рис. 4. Калибровочная линия средних значений интенсивности для зон интереса по усреднённым значениям коэффициента поглощения амниотической жидкости. Точки А, Б и В построены по данным УЗИ

Fig. 4. Calibration line of average intensity values for zones of interest based on average values of the amniotic fluid absorption coefficient. Points A, B, and C are plotted based on ultrasound data

Обсуждение результатов

Известно, что преждевременное созревание плода может наступать в разные сроки гестации, обычно в период с 30 по 34 неделю. Предложенный метод позволяет своевременно выявлять это состояние и принимать обоснованные решения о родоразрешении, что способствует предотвращению развития фетальной гипоксии и снижению рисков для здоровья плода.

Обнаружена статистическая зависимость между интенсивностью отражённого ультразвукового сигнала от околоплодных вод и степенью их окрашивания, обусловленной присутствием мекония. Аналогичная тенденция была продемонстрирована в исследовании [10], где при повышенной экзогенности амниотической жидкости выявлялось наличие мекония. Однако в этом исследовании не проводилось количественное сопоставление средней интенсивности эхосигнала в зоне интереса с показателями поглощения ультразвука амниотической жидкостью. Это ограничивало возможность точного определения диагностически значимых порогов интенсивности, ассоциированных с содержанием мекония и степенью выраженности фетальной гипоксии [11].

В отличие от традиционных инвазивных методов, таких как амниоцентез и амниоскопия, предложенный метод визуальной ультразвуковой оценки позволяет проводить количественную оценку характера амниотической жидкости на основе объективных параметров – в частности, интенсивности пикселей в градациях серого.

Построение калибровочной кривой позволило определить количественные критерии наличия мекония и степени гипоксии плода на основании среднего значения интенсивности эхосигнала в зоне интереса амниотической жидкости на ультразвуковом изображении. Значения интенсивности до 50 усл. ед. соответствуют отсутствию признаков гипоксии, в диапазоне 50–80 усл. ед. свидетельствуют о гипоксии средней степени тяжести, а превышение порога 80 усл. ед. указывает на выраженную гипоксию. Полученные данные демонстрируют высокую диагностическую информативность предлагаемого ультразвукового метода при оценке околоплодных вод в клинической практике и его применимость для раннего выявления гипоксических состояний плода.

Разработанный метод является неинвазивным, что исключает дополнительный стресс для беременной женщины – крайне нежелательный фактор в период гестации. Благодаря простоте реализации и технической доступности, данный подход не требует специализированного оборудования или условий стационарного наблюдения и может быть эффективно применён в амбулаторной практике, включая женские консультации.

Выводы

Разработан и апробирован метод неинвазивной оценки гипоксии плода на основе анализа ультразвукового изображения амниотической жидкости. Установлена взаимосвязь между интенсивностью отражённого сигнала, окраской



околоплодных вод и содержанием мекония – маркера гипоксического состояния. Метод позволяет объективно оценивать степень гипоксии плода без необходимости инвазивных процедур, таких как амниоцентез. Его простота, безопасность и возможность применения вне стационара делают его удобным инструментом для широкого клинического использования. Внедрение данной методики может повысить эффективность пренатального мониторинга, способствовать раннему выявлению гипоксии и снижению перинатальной заболеваемости и смертности. Однако для окончательной валидации требуется проведение дополнительных исследований с расширенной выборкой и последующим анализом неонатальных исходов.

Список литературы / References

1. Fajersztajn L., Veras M. M. Hypoxia: From placental development to fetal programming. *Birth Defects Research*, 2017, vol. 109, no. 17, pp. 1377–1385. <https://doi.org/10.1002/bdr2.1142>
2. Wang B., Zeng H., Liu J., Sun M. Effects of prenatal hypoxia on nervous system development and related diseases. *Frontiers in Neuroscience*, 2021, vol. 15, art. 755554. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.755554>
3. Piešová M., Mojmír M. A. C. H. Impact of perinatal hypoxia on the developing brain. *Physiological Research*, 2020, vol. 69, no. 2, pp. 199–213. <https://doi.org/10.33549/physiolres.934198>
4. Nalivaeva N. N., Turner A. J., Zhuravin I. A. Role of prenatal hypoxia in brain development, cognitive functions, and neurodegeneration. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, vol. 12, art. 825. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00825>
5. Vain N. E., Batton D. G. Meconium «aspiration» (or respiratory distress associated with meconium-stained amniotic fluid?). *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, 2017, vol. 22, no. 4, pp. 214–219. <https://doi.org/10.1016/j.siny.2017.04.002>
6. Fanaroff A. A. Meconium aspiration syndrome: Historical aspects. *Journal of Perinatology*, 2008, vol. 28, suppl. 3, pp. S3–S7. <https://doi.org/10.1038/jp.2008.162>
7. Whitfield J. M., Charsha D. S., Chiruvolu A. Prevention of meconium aspiration syndrome: An update and the Baylor experience. *Baylor University Medical Center Proceedings*, 2009, vol. 22, iss. 2, pp. 128–131. <https://doi.org/10.1080/08998280.2009.11928491>
8. Bushyreva I. O., Chernavsky V. V., Kolganova A. A. Meconium aspiration syndrome. *Saratovskij nauchno-meditsinskij zhurnal* [Saratov Scientific and Medical Journal], 2010, vol. 6, no. 2, pp. 378–383 (in Russian). EDN: MWJMPT
9. Melnik E. V., Nebyshinets L. M., Kirilenko V. P. Biochemical composition of posterior amniotic fluid in cases of abnormalities of labor forces. *Reproductive Health. Eastern Europe*, 2025, vol. 15, no. 4, pp. 418–430 (in Russian). <https://doi.org/10.34883/PL2025.15.4.002>
10. Karamustafaoglu Balci B., Goynumer G. Incidence of echogenic amniotic fluid at term pregnancy and its association with meconium. *Archives of Gynecology and Obstetrics*, 2018, vol. 297, no. 4, pp. 915–918. <https://doi.org/10.1007/s00404-018-4679-7>
11. Nalivaeva N. N., Turner A. J., Zhuravin I. A. Role of prenatal hypoxia in brain development, cognitive functions, and neurodegeneration. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, vol. 12, art. 825. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00825>

Поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 11.04.2026; принята к публикации 29.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 11.04.2026; accepted for publication 29.04.2026; published 30.06.2026



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 165–174
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 165–174
<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-165-174>, EDN: PSKIKS

Научная статья
УДК 544.723:544.723.2:535.37



Влияние пиридоксина и его производных на флуоресцентные свойства квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных растворах и на поверхности полиакрилонитрильных волокон

А. Ю. Шабунина, В. В. Оломская, Т. Ю. Русанова[✉], И. Ю. Горячева

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

Шабунина Анна Юрьевна, аспирант кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии, a.shabunina00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5329-9896>, AuthorID: 1157670

Оломская Вера Владимировна, аспирант кафедры общей и неорганической химии Института химии, o-v-v99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9065-1648>, AuthorID: 1308882

Русанова Татьяна Юрьевна, доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой аналитической химии и химической экологии Института химии, tatyanarys@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5902-3707>, AuthorID: 38756

Горячева Ирина Юрьевна, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и неорганической химии Института химии, goryachevai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1781-6180>, AuthorID: 50556

Аннотация. Пиридоксин – одна из форм витамина В6, жизненно важного водорастворимого витамина, проявляющего сильные антиоксидантные свойства. Мексидол и Эмоксипин – это отечественные препараты, активные вещества которых являются производными пиридоксина. Данные препараты обладают широким спектром фармакологического действия, в том числе антигипоксическим и ноотропным. В статье предложен способ контроля содержания активных фармацевтических ингредиентов препаратов на основе их влияния на флуоресценцию квантовых точек. Для предварительного концентрирования фармацевтических ингредиентов предложено использовать полученные методом электроформования волокна полиакрилонитрила, перспективные нетканые материалы для создания сорбентов и тест-средств. С их помощью можно проводить концентрирование аналитов. Для определения концентрации активных фармацевтических ингредиентов использованы тройные квантовые точки $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$, обладающие такими преимуществами как яркая флуоресценция, биосовместимость, нетоксичность, возможность взаимодействия с лекарственными средствами. В работе изучено влияние пиридоксина, этилметилгидроксипиридина, этилметилгидроксипиридина сукцината на интенсивность флуоресценции фракций тройных квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных растворах и нанесенных на волокно полиакрилонитрила. Используются фракции квантовых точек с максимумами люминесценции 591 и 620 нм в связи с их наибольшим квантовым выходом и максимальным цветовым контрастом. Для витамина В6 наиболее чувствительной оказалась фракция квантовых точек 620 нм, нанесенных на волокна полиакрилонитрила, а для препарата Эмоксипин – фракция квантовых точек с максимумом 620 нм в водном растворе. Влияние препаратов на КТ может быть описано линейной зависимостью интенсивности флуоресценции от концентрации аналитов (с высоким значением коэффициента детерминации для В6). По времени затухания можно сделать вывод, что процессы на поверхности вносят наибольший вклад при взаимодействии квантовых точек и Мексидола. Для витамина В6 и Эмоксипина с квантовыми точками $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ необходимо исследовать наличие электростатического или иного взаимодействия. Дополнительного изучения требует влияние вспомогательных веществ, присутствующих в лекарственных формах, морфология нетканого материала.

Ключевые слова: волокна полиакрилонитрила, люминесценция, квантовые точки $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$, сорбция, определение лекарственных препаратов, пиридоксин, витамин В6, этилметилгидроксипиридин, этилметилгидроксипиридина сукцинат

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-23-00519).

Для цитирования: Шабунина А. Ю., Оломская В. В., Русанова Т. Ю., Горячева И. Ю. Влияние пиридоксина и его производных на флуоресцентные свойства квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных растворах и на поверхности полиакрилонитрильных волокон // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 165–174. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-165-174>, EDN: PSKIKS

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

Article

The effect of pyridoxine and its derivatives on the fluorescent properties of $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots in aqueous solutions and on the surface of polyacrylonitrile fibers

A. Yu. Shabunina, V. V. Olomskaia, T. Yu. Rusanova[✉], I. Yu. Goryacheva

© Шабунина А. Ю., Оломская В. В., Русанова Т. Ю.,
Горячева И. Ю., 2026



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

Ann Yu. Shabunina, a.shabunina00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5329-9896>, AuthorID: 1157670

Vera V. Olomskaya, o-v-v99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9065-1648>, AuthorID: 1308882

Tatiana Yu. Rusanova, tatyaryas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5902-3707>, AuthorID: 38756

Irina Yu. Goryacheva, goryachevaiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1781-6180>, AuthorID: 50556

Abstract. Background and Objectives: Pyridoxine is a form of vitamin B6, a vital water-soluble vitamin with strong antioxidant properties. Mexidol and Emoxipin are domestically produced medications whose active ingredients are pyridoxine derivatives. These drugs have a broad spectrum of pharmacological effects, including antihypoxic and nootropic effects. This article proposes a method for monitoring the content of active pharmaceutical ingredients in medications based on their effect on the fluorescence of quantum dots. For pre-concentration of drugs, we propose using polyacrylonitrile fibers produced by electrospinning. These fibers promising for creating sorbents and test kits. Moreover they can be used for pre-concentration and subsequent determination of analytes. Triple quantum dots AgInS₂/ZnS, which offer advantages such as bright fluorescence, biocompatibility, non-toxicity, and the ability to interact with drugs, were used to detect the concentration of active pharmaceutical ingredients. **Materials and Methods:** The fiber was obtained by electrospinning (voltage 70 ± 5 kV, spinning time 60 minutes, solvent dimethylformamide, current 0.02 mA). Fractions of previously synthesized 591 and 620 nm AgInS₂/ZnS quantum dots were used. The effect of vitamin B6, Mexidol, and Emoxipin on the luminescent properties of the quantum dots was studied by sorption of aqueous solutions with varying drug concentrations and a constant quantum dot concentration onto polyacrylonitrile fibers. **Results:** For vitamin B6, the most sensitive fraction was the 620 nm quantum dot fraction applied to polyacrylonitrile fibers, and for the drug Emoxipin, the most sensitive fraction was the quantum dot fraction with a maximum of 620 nm in an aqueous solution. The action of the drugs can be described by a linear dependence of the fluorescence intensity on the concentration of the analytes (with a high value of the coefficient of determination for B6). **Conclusion:** Based on the decay time, it can be concluded that surface processes make the greatest contribution to the interaction between quantum dots and Mexidol. For vitamin B6 and Emoxipin with AgInS₂/ZnS, the presence of electrostatic or other interactions should be investigated. The influence of excipients presents in dosage forms and the morphology of the nonwoven material require additional study.

Keywords: polyacrylonitrile fibers, luminescence, AgInS₂/ZnS quantum dots, sorption, drug detection, pyridoxine, vitamin B6, ethylmethylhydroxypyridine, ethylmethylhydroxypyridine succinate

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-23-00519).

For citation: Shabunina A. Yu., Olomskaya V. V., Rusanova T. Yu., Goryacheva I. Yu. The effect of pyridoxine and its derivatives on the fluorescent properties of AgInS₂/ZnS quantum dots in aqueous solutions and on the surface of polyacrylonitrile fibers. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 165–174 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-165-174>, EDN: PSKIKS

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

Введение

На основе витамина B6, участвующего в метаболизме аминокислот и проявляющего антиоксидантную активность [1] синтезирован отечественный оригинальный препарат Мексидол. Он обеспечивает нейропротекторное действие и широкий спектр клинических эффектов за счет имеющихся в его составе двух связанных и функционально значимых компонентов: 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина и сукцината. С наличием 3-гидроксипиридина в структуре Мексидола связаны антиоксидантная и мембранотропная активность препарата, сукцинат в составе обеспечивает способность индуцировать сукцинатный рецептор SUCNR1, улучшать сукцинатную сигнализацию, стимулировать митохондриогенез, восстанавливать митохондриальное дыхание и активизировать цикл Кребса, повышать энергетический статус клетки, что обуславливает антигипоксическое действие [2].

В настоящее время квантовые точки (КТ) широко применяются для решения практических задач в области медицинской диагностики. Одно из существенных преимуществ тройных

квантовых точек состава AgInS₂/ZnS (полупроводниковое ядро AgInS₂, оболочка ZnS) – это их высокая эффективность в поглощении света и излучении, стабильная фотолюминесценция и широкий спектр излучения. В связи с этим их применяют в оптоэлектронике и фотонике, а так как в их состав не входят токсичные тяжёлые металлы (кадмий и свинец), это обуславливает широту их применения и в биомедицине [3–5]. КТ состава AgInS₂/ZnS применяются в качестве зондов для детектирования некоторых металлов [6–8].

На сегодняшний день особое место занимает применение тройных квантовых точек как носителей веществ в определённый участок внутри тела или конкретный орган, где они необходимы. Нетоксичная природа этих квантовых точек, а также растворимость в воде, отличная биосовместимость и контролируемый профиль высвобождения лекарств в целевых участках делают их предпочтительными наноносителями по сравнению с другими носителями, такими как липосомы, хитозан и полимерные наночастицы [9].



Квантовые точки применяются также в диагностике раковых клеток. Для использования квантовых точек состава $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в качестве флуоресцентных зондов в исследованиях *in vitro* они должны обладать низкой физиологической токсичностью и хорошей стабильностью в физиологическом диапазоне pH. В работе [10] изучено влияние pH и ионной силы на фотолюминесцентные свойства фракций квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$. В сильно кислых и щелочных средах наблюдались резкие изменения; диапазон pH и ионной силы, соответствующий биологическим жидкостям, не оказал существенного влияния на фотолюминесцентные свойства всех фракций квантовых точек. Это указывает на потенциальное применение этих нанообъектов в качестве фотолюминесцентных зондов в различных биоприложениях. Разработанные методы неинвазивного скрининга раковых клеток показали значительное улучшение чувствительности по сравнению с клиническим классическим цитологическим исследованием [11–13].

Волокна, получаемые методом электроформования (нетканые материалы), приобрели значимость практически во многих отраслях промышленности, особенно в фармацевтической и биомедицинской, благодаря своим исключительным физико-химическим свойствам. Такие волокна формируют из различных полимеров в зависимости от их назначения. Многие из них биоразлагаемы и биосовместимы, а также способны создавать высокопористую структуру с высокой сорбционной емкостью, что делает их пригодными в широком спектре применений, включая упаковку, доставку лекарств, медицинские имплантаты органов и тканей, заживление ран и перевязочные материалы в фармацевтической промышленности, а также использование в качестве фильтров или адсорбентов при очистке воды [14]. Электроформование стало революционным методом изготовления волокон, обеспечивая точный контроль их морфологией, составов и функциональности. Этот универсальный процесс позволяет получать волокна от нано- до микромасштабов с заданными свойствами, интегрируя разнообразные материалы и архитектуры для передовых исследований и промышленных применений.

Полимеры являются одним из наиболее широко изученных классов материалов для электроформования из-за простоты настройки

композиции путем простого выбора различных совместимых пар полимера и растворителя. Процесс электроформования позволяет изготавливать волокна с определенным диапазоном размера диаметра и высоким отношением длины волокна к его диаметру, что приводит к получению материалов с исключительной структурной стабильностью и масштабируемостью. Ключевое преимущество электроформованных полимерных нано- и микроволокон заключается в их настраиваемых механических свойствах, которые можно точно контролировать, регулируя критические параметры формования, такие как вязкость раствора, концентрация полимера, приложенное напряжение и расстояние от иглы до коллектора.

Например, в работе [15] исследованы нетканые материалы на основе фторопласта, изучено влияние таких параметров, как межэлектродное расстояние и вязкость формовочного раствора, на характеристики сформованных материалов, включая размер самого материала, диаметр его волокон, а также смачиваемость его поверхности. Показано, что оптимальное межэлектродное расстояние должно составлять от 15 до 25 см. Результаты исследования адресованы для использования при оптимизации технологических процессов получения нетканых материалов из фторопласта.

Технологические параметры электроформования влияют на свойства получаемых биомедицинских волокон и мембран. Подбираются оптимальная концентрация (однородные волокна), более высокая молекулярная масса (более гладкие волокна), более высокая проводимость (меньший и однородный диаметр волокна) и оптимальная вязкость (постоянный выброс струи/иглы). Параметры окружающей среды, такие как рабочая температура и влажность, также играют важную роль в контроле параметров волокна [16]. Электроформованные волокна активно применяются в функциональных мембранах, газовых датчиках, энергетических системах и каталитических процессах, решая критически важные задачи в этих областях [17].

Целью данной работы явилась оценка возможности определения пиридоксина, этилметилгидроксипиридина, этилметилгидроксипиридина сукцината на основе их влияния на интенсивность флуоресценции фракций тройных квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных



растворах и нанесенных на волокно полиакрилонитрила.

Материалы и методы

Материалы

В работе использовались: полиакрилонитрил (ПАН) ($\text{CH}_2\text{-CH}(\text{CN})_n$) производство ОАО «Пластполимер», г. Санкт-Петербург; диметилформамид (ДМФА, х. ч.) производство Реахим, г. Москва; пиридоксин ($\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}_3\cdot\text{HCl}$), витамин В6, раствор для инъекций 50 мг/мл, производство ОАО «Борисовский завод медицинских препаратов»; этилметилгидроксипиридина сукцинат ($\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}\cdot\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$), мексидол, раствор для инъекций 50 мг/мл, производство ООО «Фармасофт», г. Москва; этилметилгидроксипиридин ($\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}$), эмоксипин, раствор для инъекций 10 мг/мл, производство ФГУП «Московский эндокринный завод»; нитрат серебра (AgNO_3 , 99.0%), хлорид индия (InCl_3 , 99.9%), тиогликолевая кислота (ТГК, 98.0%), безводный сульфид натрия (Na_2S , 90%+), раствор аммиака (5М), безводный ацетат цинка (II) ($\text{Zn}(\text{CH}_2\text{COO})_2$), азотная кислота (70%), производство Sigma-Aldrich, г. Сент-Луис (США). Хлорид натрия, хлористый водород и 2-пропанол получены от компании «Экос-1» (г. Москва). Вода, использованная в ходе данного исследования, получена с помощью системы очистки воды Milli-Q (18.2 МОм·см, Millipore, г. Дармштадт, Германия).

Оборудование

Спектры флуоресценции регистрировали на гибридном ридере BioTek Synergy H1 (BioTek Instruments corp., США) в 96-луночном планшете. Длина волны возбуждения составляла 360 нм, диапазон длин волн регистрации люминесценции 500–700 нм. Подробнее выбор условий регистрации описан в работе [10].

Измерения времени жизни люминесценции проводили с помощью флуориметра DeltaPro TCSPC Lifetime Fluorometer (HORIBA Scientific, Киото, Япония).

Спектры поглощения растворов записывали на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Shimadzu, Япония).

Волокна электроформовали с использованием прибора Elmarco «Nanospider NS Lab 200» (Elmarco, г. Либерец, Чехия).

Исследование морфологии поверхности волокон проведено в лаборатории диагностики

наноматериалов и структур Образовательно-научного института наноструктур и биосистем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU (Tescan, г. Брно, Чехия) на базе Центра коллективного пользования СГУ. Разрешающая способность микроскопа достигает 1 нм.

Исследования проводили в режиме высокого вакуума порядка 10^{-2} Па при ускоряющем напряжении 30 кВ. Подготовка образца к исследованию включала в себя нанесение токопроводящей реплики из золота (Au) с помощью магнетронного напыления. Толщина реплики контролировалась током плазмы и временем напыления. Толщина напыления – от 5 до 10 нм, что позволяет получать микрофотографии с большим увеличением без собственной визуализации напыляемого вещества. Изображения морфологии поверхности получены во вторичных электронах.

Методики регистрации спектров флуоресценции

Спектры флуоресценции регистрировали при помощи полимерного иммунологического планшета с 72 лунками. Для системы «Препарат-КТ» вносили в лунку 80 мкл водного раствора препарата и 20 мкл КТ. Для системы «ПАН-препарат-КТ» на дно лунки клали нетканый материал размером 5 х 5 мм, добавляли 5 мкл водного раствора препарата, высушивали, затем добавляли 20 мкл КТ.

Методика измерения времени жизни люминесценции квантовых точек в отсутствие и присутствии препаратов

Измерения времени жизни люминесценции проводили для коллоида квантовых точек с оптической плотностью 0.1 при 360 нм. Измерения проводили в стандартной 10-мм кварцевой кювете без оптических фильтров или монохроматора при поляризации регистрируемого излучения 54.7° . Функция отклика прибора IRF регистрировалась с рассеивающей кварцевой кюветы, заполненной бидистиллированной водой. Диапазон измерений составлял 870 нс.

Приготовление формовочного раствора полимера и получение нетканых материалов

Навеску полимера (13 мас.%) растворяли в ДМФА при постоянном перемешивании (300 об/мин) и нагреве (50°C). Условия получения материала представлены в табл. 1.



Таблица 1 / Table 1

Условия формирования нетканого материала
Conditions for forming nonwoven material

Параметр / Parameter	Значение / Value
Массовая доля ω , % / Mass fraction ω , %	13
Объем формовочного раствора V , мл / Volume of solution V , ml	100
Температура T , °C / Temperature T , °C	50 ± 3
Влажность, % / Humidity, %	10 ± 3
Напряжение U , кВ / Voltage U , kV	70 ± 5
Сила тока I , мА / Current I , mA	0.02
Напряженность, кВ/см / Electric field strength, kV/cm	4.4 ± 1
Растворитель / Solvent	ДМФА / DMF
Время формования τ , мин / Spinning time τ , min	60
Расстояние от электрода до коллектора, см / Distance from electrode to collector, cm	12–20

Изучение морфологии нетканых материалов на основе полиакрилонитрила

Поверхность полученных нетканых материалов на основе полиакрилонитрила изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Волокно ПАН имеет в поперечном сечении округлую форму (рис. 1). Поверхности волокон однородны и не имеют видимых дефектов. Диаметры отдельных волокон исходного материала ПАН находились в пределах

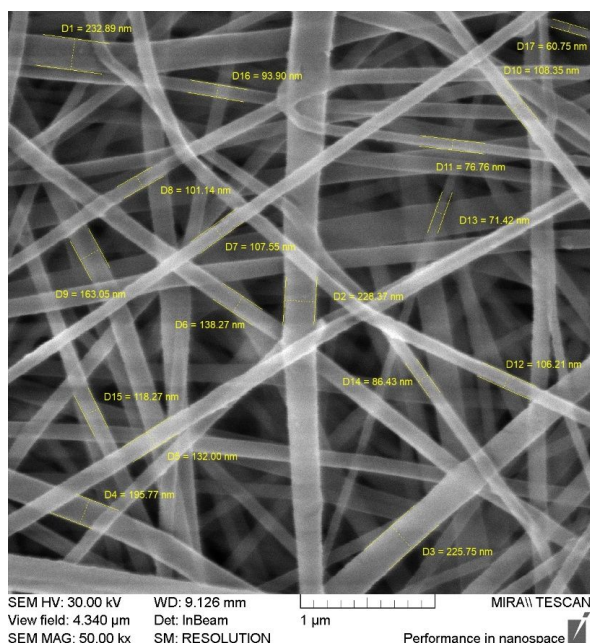


Рис. 1. СЭМ-изображения волокон ПАН
Fig. 1. SEM images of PAN fibers

от 60 до 230 нм; средний диаметр, рассчитанный по 17 точкам, составил 132 нм.

Синтез КТ AgInS₂/ZnS.

Фракционирование по размерам

В 96 мл воды при комнатной температуре последовательно смешивали прекурсоры: 1 мл AgNO₃ (0.1 М), 2 мл ТГК (1 М), 0.65 мл NH₃·H₂O (5 М), 0.7 мл InCl₃ (1.0 М) и 1 мл Na₂S (10 М) для синтеза ядер AgInS₂. Затем раствор нагревали в течение 30 мин при 90–95°C. Далее наносили оболочку ZnS следующим образом: в горячий раствор добавляли 1 мл Zn(CH₃COO)₂ (1.0 М) и 1 мл ТГК (1.0 М) и нагревали при той же температуре в течение 30 мин. Полученный раствор содержит смесь КТ разных размеров. Разделение по размерам проводили при помощи последовательного осаждения с помощью изопропилового спирта как антирастворителя. Получили серию КТ с максимумом флуоресценции 516–620 нм [18, 19]. Для дальнейших исследований использовали фракции с максимумом флуоресценции 620 и 591 нм. Исходные растворы квантовых точек разбавляли до значения оптической плотности 0.1.

Приготовление растворов витамина В6, этилметилгидрокси-пиридина, этилметилгидроксипиридина сукцината

Раствор витамина В6 с концентрацией 500 мг/л: 1 мл препарата с концентрацией 50 мг/мл перенесли в колбу на 100 мл и довели дистиллированной водой до метки.

Раствор мексидола с концентрацией 500 мг/л: 1 мл препарата с концентрацией 50 мг/мл перенесли в колбу на 100 мл.

Раствор этилметилгидроксипиридина с концентрацией 100 мг/л: 1 мл препарата с концентрацией 10 мг/мл перенесли в колбу на 100 мл и довели дистиллированной водой до метки.

Градуировочные растворы витамина В6, мексидола и этилметилгидроксипиридина (2, 6, 10, 14, 20 мг/л) готовили путем последовательного разбавления исходных растворов.

Результаты и их обсуждение

Структурные формулы исследуемых соединений – пиридоксина и его производных (этилметилгидроксипиридина и этилметилгидроксипиридина сукцината) представлены в табл. 2.

Для электроформования полимерных волокон выбран полиакрилонитрил, так как в предварительных экспериментах он показал наилучшие



Таблица 2 / Table 2

Структурные формулы пиридоксина, этилметилгидроксипиридина, этилметилгидроксипиридина сукцината
Structural formulas of vitamin B6, ethylmethylhydroxypyridine, ethylmethylhydroxypyridine succinate

Вещество / Substance	Структурная формула / Structural formula	Лекарственный препарат / Drug
Пиридоксин / Pyridoxine		Витамин B6 / Vitamin B6
Этилметилгидроксипиридина сукцинат / Ethylmethylhydroxypyridine succinate		Мексидол / Mexidol
Этилметилгидроксипиридин / Ethylmethylhydroxypyridine		Эмоксипин / Emoxipin

сорбционные характеристики (степень извлечения и предельную адсорбцию) по отношению к изучаемым препаратам.

В спектрах поглощения этилметилгидроксипиридина наблюдается полоса поглощения с максимумом в области 300 нм (рис. 2), для КТ поглощение в этой области спектра практически отсутствует. При добавлении КТ к этилметилгидроксипиридину положение полосы

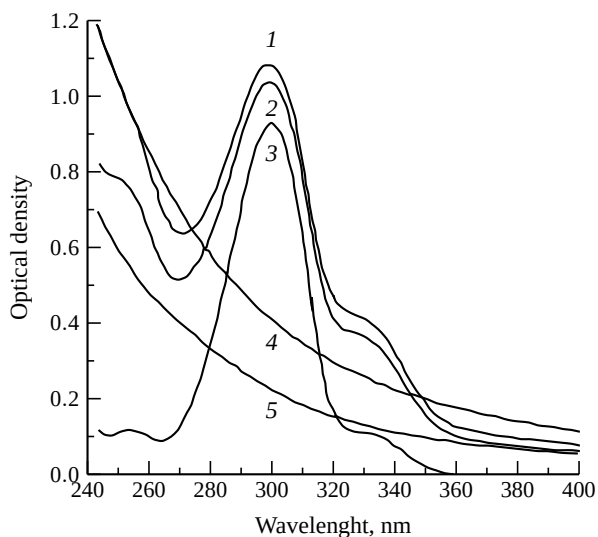


Рис. 2. Спектры поглощения исследуемых препаратов и материалов: 1 – система «Эмоксипин – КТ 591 нм», 2 – система «Эмоксипин – КТ 620 нм», 3 – «Эмоксипин», 4 – КТ 620 нм, 5 – КТ 591 нм

Fig. 2. Absorption spectra of the studied drugs and materials. 1 – system “Emoxipin – QDs 591 nm”, 2 – system “Emoxipin – QDs 620 nm”, 3 – “Emoxipin”, 4 – QDs 620 nm, 5 – QDs 591 nm

не меняется, небольшое возрастание оптической плотности объясняется фоновым поглощением КТ. Подобная картина наблюдалась и для других препаратов.

Спектры флуоресценции исследуемых препаратов показали отсутствие полос испускания в диапазоне от 500 до 700 нм. На рис. 3 представлены спектры поглощения КТ фракций с максимумами люминесценции 591 и 620 нм. Обнаружено усиление интенсивности флуоресценции КТ с увеличением концентрации препаратов как в растворах, так и нанесенных на поверхность ПАН.

Примеры градуировочных зависимостей интенсивности флуоресценции от концентрации аналита представлены на рис. 4. Уравнения для этих зависимостей приведены в табл. 3. Усиление флуоресценции КТ в присутствии препаратов на волокне ПАН позволит в дальнейшем комбинировать предварительное концентрирование веществ на волокне с детектированием концентрации по интенсивности флуоресценции КТ.

Временная зависимость затухания фотолюминесценции квантовых точек позволяет получить представление о динамике процесса. Для квантовых точек временные зависимости затухания фотолюминесценции имели многоэкспоненциальный характер и успешно аппроксимированы трехэкспоненциальной функцией:

$$I(t) = I(0) \sum_{i=1}^3 A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}$$

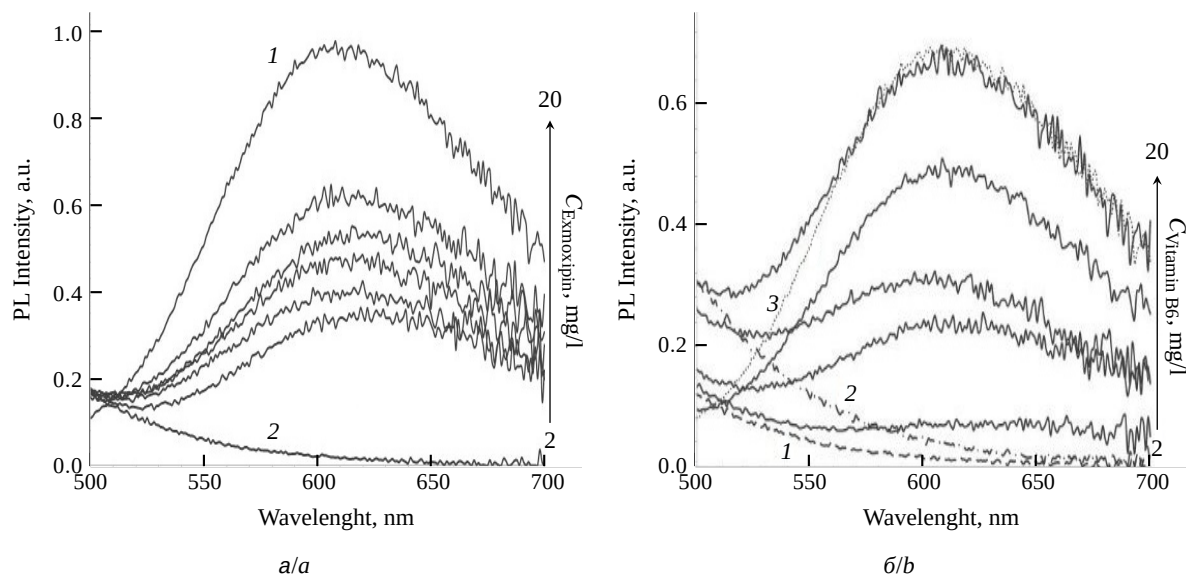


Рис. 3. Спектры флуоресценции при разных концентрациях действующего вещества: а – система «Эмоксипин – КТ 591 нм»: 1 – КТ 591 нм (6 графиков), 2 – «Эмоксипин»; б – система «Витамин В6 – КТ 591 нм/ПАН»: 1 – Витамин В6 (2 графика), 2 – ПАН (4 графика), 3 – КТ 591 нм. Длина волны возбуждения 360 нм

Fig. 3. Fluorescence spectra at different concentrations of the active substance: a – system “Emoxipin – QDs 591 nm”: 1 – QDs 591 nm (6 graphs), 2 – “Emoxipin”; b – system “Vitamin B6 – QDs 591 nm/PAN”: 1 – Vitamin B6 (2 graphs), 2 – PAN (4 graphs), 3 – QDs 591 nm. The excitation wavelength is 360 nm

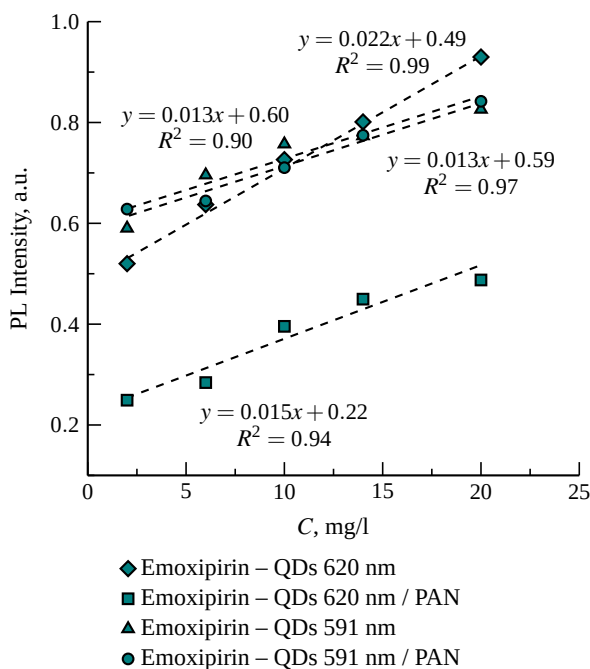


Рис. 4. Градуировочные зависимости интенсивности люминесценции КТ от концентрации эмоксипина
Fig. 4. Calibration curves of the luminescence intensity vs the Emoxipine concentration

Оценку кинетики взаимодействия КТ и препаратов проводили на основе анализа времени затухания КТ 620 нм и системы «Мексидол – КТ 620 нм» при постоянной концентрации мексидола 20 мг/л (табл. 4).

Таблица 3 / Table 3

Уравнения зависимостей интенсивности флуоресценции КТ от концентрации препаратов и коэффициента детерминации

Equations for the dependence of QD fluorescence intensity on the concentration of drugs and coefficients of determination R^2

Препарат / Drugs	КТ, нм / QDs, nm	Сорбент / Sorbent	Уравнение / Equation	R^2
Мексидол / Mexidol	591	–	$y = 0.031x \pm 0.47$	0.79
		ПАН / PAN	$y = 0.027x \pm 0.50$	0.76
	620	–	$y = 0.006x \pm 0.41$	0.54
		ПАН / PAN	$y = 0.011x \pm 0.32$	0.82
Эмоксипин / Emoxipin	591	–	$y = 0.013x \pm 0.60$	0.90
		ПАН / PAN	$y = 0.013x \pm 0.59$	0.98
	620	–	$y = 0.022x \pm 0.49$	0.99
		ПАН / PAN	$y = 0.015x \pm 0.22$	0.94
Витамин В6 / Vitamin B6	591	–	$y = 0.002x \pm 0.46$	0.04
		ПАН / PAN	$y = 0.026x \pm 0.06$	0.92
	620	–	$y = 0.015x \pm 0.58$	0.97
		ПАН / PAN	$y = 0.038x \pm 0.02$	0.99



Кривая затухания состоит из нескольких компонент, каждая из них связана с определенным процессом. Быстрая компонента (τ_1) оценивает вклад рекомбинации экситонов на краю зоны КТ. Средняя компонента (τ_2) отражает влияние электронных или дырочных ловушек. Медленная компонента (τ_3) связана с эффектами на поверхности [20, 21]. Сравнение времен затухания показывает значительное влияние мексидола на среднюю и медленную компоненты.

Таблица 4 / Table 4

Времена затухания люминесценции КТ AgInS₂/ZnS 620 нм в отсутствие и присутствии мексидола
Luminescence decay times of AgInS₂/ZnS 620 nm QDs in the absence and presence of Mexidol

Система / System	τ_1 , нс / τ_1 , ns	τ_2 , нс / τ_2 , ns	τ_3 , нс / τ_3 , ns
КТ 620 нм / QDs 620 nm	398	1314	78.8
Мексидол – КТ 620 нм / Mexidol – QDs 620 nm	262	0.79	1000

Заключение

В работе продемонстрирован эффект усиления флуоресценции КТ AgInS₂/ZnS в присутствии пиридоксина и его производных (этилметилгидроксипиридина и эилметилгидроксипиридина сукцината). Используются фракции КТ 591 и 620 нм в связи с их наибольшим квантовым выходом по сравнению с другими фракциями и максимальным цветовым контрастом.

Влияние препаратов на КТ может быть описано линейной зависимостью интенсивности флуоресценции от концентрации аналитов. Для витамина В6 наиболее чувствительной является фракция КТ 620 нм при сорбции на ПАН (в этом случае коэффициент детерминации близок к 1, см. табл. 3), а для препарата «Эмоксипин» наиболее чувствительна фракция КТ 620 нм в водном растворе. Мексидол дает наименьшее усиление флуоресценции КТ AgInS₂/ZnS. Это может быть связано с наличием вспомогательных веществ, входящих в состав лекарственных препаратов, что требует дополнительного изучения.

Анализ времен затухания показал, что процессы на поверхности вносят наибольший вклад при взаимодействии КТ и мексидола, поэтому требуется более детальное изучение этих процессов. Необходимо также исследовать взаимодействие витамина В6 и эмоксипина с КТ

AgInS₂/ZnS с точки зрения электростатического или иного взаимодействия.

Влияние нетканого материала на люминесценцию неоднозначно. С ростом концентрации витамина В6 увеличивается значение коэффициента детерминации, что может быть связано с наличием большего числа гидроксильных групп и отсутствием мешающих вспомогательных веществ в составе лекарственной формы.

Требуется дополнительное изучение как зависимости флуоресценции от соотношения концентрации препаратов и КТ, так и влияния морфологии нетканого материала на сорбционные и флуоресцентные свойства системы.

Список литературы

1. Calori I., Gusmão L., Tedesco A. B6 vitamers as generators and scavengers of reactive oxygen species // J. Photochem. Photobiol. A. 2021. Vol. 7. Art. 100041. <https://doi.org/10.1016/j.jprap.2021.100041>
2. Воронина Т. А., Литвинова С. А., Гладышева Н. А., Шульдин А. В. Известные и новые представления о механизме действия и спектре эффектов Мексидола // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2025. Т. 125, № 5. С. 22–33. <https://doi.org/10.17116/jnevro202512505122>
3. Yosypenko Y., Mykhailovych V., Yosypenko V., Rotaru A., Khalavka Y. Optical properties and thermal sensitivity of AgInS₂ and AgInS₂/ZnS quantum dots embedded in barium sulphate and calcium carbonate matrices // Opt. Mater. 2025. Vol. 158. Art. 116441. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116441>
4. Yang F., Wang Y., Gao J., Sui N., Liu Q., Wang Y., Liu L., Zou L., Kang Z., Zhang H. Studying of the photoluminescence characteristics of AgInS₂ quantum dots // J. Nanopart. Res. 2015. Vol. 17. Art. 159. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2970-0>
5. Wang X., Xie C., Zhong J., Liang X., Xiang W. Synthesis and temporal evolution of Zn-doped AgInS₂ quantum dots // J. Alloys Compd. 2015. Vol. 648. P. 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.240>
6. Sun Z., Liu Y., Wei F., Wu Y., Wei L., Tian Y., Zhang Y., Wei C. Aqueous AgInS₂/ZnS quantum dot-based fluorescent probes for highly selective detection of Cu (II) ions // ACS Appl. Nano Mater. 2025. Vol. 8, iss. 27. P. 13876–13885. <https://doi.org/10.1021/acsnm.5c02494>
7. Parani S., Oluwafemi O. S. Selective and sensitive fluorescent nanoprobe based on AgInS₂-ZnS quantum dots for the rapid detection of Cr (III) ions in the midst of interfering ions // Nanotechnology. 2020. Vol. 31, iss. 39. Art. 395501. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab9c58>
8. Kurshanov D. A., Khavlyuk P. D., Baranov M. A., Dubavik A., Rybin A. V., Fedorov A. V., Baranov A. V. Magneto-fluorescent hybrid sensor CaCO₃-Fe₃O₄-AgInS₂/ZnS for the detection of heavy metal ions in aqueous media // Materials. 2020. Vol. 13, iss. 19. Art. 4373. <https://doi.org/10.3390/ma13194373>



9. Aladesuyi O., Lebepe T., Maluleke R., Oluwafemi O. Biological applications of ternary quantum dots: A review // *Nanotechnol. Rev.* 2022. Vol. 11, № 1. P. 2304–2319. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0136>
10. Пономарева Т. С., Оломская В. В., Новикова А. С., Горячева И. Ю. Влияние pH и ионной силы на фотолюминесценцию фракционированных по размеру квантовых точек AgInS₂/ZnS // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика.* 2023. Т. 23, вып. 3. С. 238–244. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-3-238-244>
11. Su W., Yang D., Wang Y., Kong Y., Zhang W., Wang J., Fei Y., Guo R., Ma J., Mi L. AgInS₂/ZnS quantum dots for noninvasive cervical cancer screening with intracellular pH sensing using fluorescence lifetime imaging microscopy // *Nano Research.* 2022. Vol. 15, iss. 6. P. 5193–5204. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4104-1>
12. Maji S. K. Luminescence-tunable ZnS–AgInS₂ nanocrystals for cancer cell imaging and photodynamic therapy // *ACS Appl. Bio Mater.* 2022. Vol. 5, iss. 3. P. 1230–1238. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c01247>
13. Ponomaryova T. S., Olomsкая V. V., Abalymov A. A., Anisimov R. A., Drozd D. D., Drozd A. V., Novikova A. S., Lomova M. V., Zakharevich A. M., Goryacheva I. Yu., Goryacheva O. A. Visualization of 2D and 3D tissue models via size-selected aqueous AgInS₂/ZnS quantum dots // *ACS Appl. Mater. & Interfaces.* 2024. Vol. 16, iss. 31. P. 40483–40498. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c05681>
14. Anusiya G., Jaiganesh R. A review on fabrication methods of nanofibers and a special focus on application of cellulose nanofibers // *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.* 2022. Vol. 4. Art. 100262. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100262>
15. Шабунина А. Ю., Волоковойнова Л. Д., Кожевников И. О., Зайцев Д. П., Терин Д. В., Савельева М. С., Русанова Т. Ю., Сердобинцев А. А., Демина П. А. Исследование влияния условий электроформования на характеристики нетканого материала на основе фторопласта Ф42Л // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Химия. Биология. Экология.* 2025. Т. 25, вып. 2. С. 151–162. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-151-162>
16. Chinnappan B., Krishnaswamy M., Xu H., Hoque M. Electrospinning of biomedical nanofibers/nanomembranes: Effects of process parameters // *Polymers.* 2022. Vol. 14, iss. 18. Art. 3719. <https://doi.org/10.3390/polym14183719>
17. Cho Y., Baek J., Sagong M., Ahn S., Nam J., Kim I.-D. Electrospinning and Nanofiber Technology: Fundamentals, Innovations, and Applications // *Materials.* 2025. Vol. 37, iss. 28. Art. 2500162. <https://doi.org/10.1002/adma.202500162>
18. Оломская В. В., Горячева И. Ю. Влияние доксорубицина на флуоресцентные свойства квантовых точек AgInS₂/ZnS в воде и плазме крови // *Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2024 : сборник статей Всероссийской школы-семинара / под ред. проф. Ан. В. Скрипала. Саратов :* Издательство «Саратовский источник», 2024. С. 156–159. EDN: EELUGM
19. Radvanskaya A., Lesnyak V., Haubold D., Dzhagan V., Stroyuk O., Gaponik N., Zahn D. R. T., Eychmuller A. A fine size selection of brightly luminescent water-soluble Ag–In–S/ZnS quantum dots // *J. Phys. Chem. C.* 2017. Vol. 121, iss. 16. P. 9032–9042. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b00849>
20. Roy D., Routh T., Asaithambi A. V., Mandal S., Mandal P. K. Spectral and temporal optical behavior of blue-, green-, orange-, and red-emitting CdSe-based Core/Gradient alloy shell/Shell quantum dots: Ensemble and single-particle investigation results // *J. Phys. Chem. C.* 2016. Vol. 120, iss. 6. P. 3483–3491. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10051>
21. Zhong H., Zhou Y., Ye M., He Y., Ye J., He C., Yang C., Li Y. Controlled synthesis and optical properties of colloidal ternary chalcogenide CuInS₂ nanocrystals // *Chem. Mater.* 2008. Vol. 20, iss. 20. P. 6434–6443. <https://doi.org/10.1021/cm8006827>

Список литературы / References

1. Calori I., Gusmão L., Tedesco A. B6 vitamers as generators and scavengers of reactive oxygen species. *J. Photochem. Photobiol. A.*, 2021, vol. 7, art. 100041. <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100041>
2. Voronina T. A., Litvinova S. A., Gladysheva N. A., Shulyndin A. V. The known and new ideas about the mechanism of action and the spectrum of effects of Mexidol. *S. S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*, 2025, vol. 125, no. 5, pp. 22–33 (in Russian). <https://doi.org/10.17116/jnevro202512505122>
3. Yosypenko Y., Mykhailovych V., Yosypenko V., Rotaru A., Khalavka Y. Optical properties and thermal sensitivity of AgInS₂ and AgInS₂/ZnS quantum dots embedded in barium sulphate and calcium carbonate matrices. *Opt. Mater.* 2025, vol. 158, art. 116441. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116441>
4. Yang F., Wang Y., Gao J., Sui N., Liu Q., Wang Y., Liu L., Zou L., Kang Z., Zhang H. Studying of the photoluminescence characteristics of AgInS₂ quantum dots. *J. Nanopart. Res.*, 2015, vol. 17, art. 159. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2970-0>
5. Wang X., Xie C., Zhong J., Liang X., Xiang W. Synthesis and temporal evolution of Zn-doped AgInS₂ quantum dots. *J. Alloys Compd.*, 2015, vol. 648, pp. 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.240>
6. Sun Z., Liu Y., Wei F., Wu Y., Wei L., Tian Y., Zhang Y., Wei C. Aqueous AgInS₂/ZnS quantum dot-based fluorescent probes for highly selective detection of Cu (II) ions. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2025, vol. 8, iss. 27, pp. 13876–13885. <https://doi.org/10.1021/acsanm.5c02494>
7. Parani S., Oluwafemi O. Selective and sensitive fluorescent nanoprobe based on AgInS₂–ZnS quantum dots for the rapid detection of Cr (III) ions in the midst of interfering ions. *Nanotechnology*, 2020, vol. 31, iss. 39, art. 395501. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab9c58>



8. Kurshanov D. A., Khavlyuk P. D., Baranov M. A., Dubavik A., Rybin A. V., Fedorov A. V., Baranov A. V. Magneto-fluorescent hybrid sensor $\text{CaCO}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-AgInS}_2\text{/ZnS}$ for the detection of heavy metal ions in aqueous media. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 19, art. 4373. <https://doi.org/10.3390/ma13194373>
9. Aladesuyi O., Lebepe T., Maluleke R., Oluwafemi O. Biological applications of ternary quantum dots: A review. *Nanotechnol. Rev.*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 2304–2319. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0136>
10. Ponomaryova T. S., Olomskaya V. V., Novikova A. C., Goryacheva I. Yu. Effect of pH and ionic strength on the photoluminescence of size-fractionated $\text{AgInS}_2\text{/ZnS}$ quantum dots. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 238–244 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-3-238-244>
11. Su W., Yang D., Wang Y., Kong Y., Zhang W., Wang J., Fei Y., Guo R., Ma J., Mi L. $\text{AgInS}_2\text{/ZnS}$ quantum dots for noninvasive cervical cancer screening with intracellular pH sensing using fluorescence lifetime imaging microscopy. *Nano Research*, 2022, vol. 15, iss. 6, pp. 5193–5204. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4104-1>
12. Maji S. K. Luminescence-tunable ZnS-AgInS_2 nanocrystals for cancer cell imaging and photodynamic therapy. *ACS Appl. Bio Mater.*, 2022, vol. 5, iss. 3, pp. 1230–1238. <https://doi.org/10.1021/acsbam.1c01247>
13. Ponomaryova T. S., Olomskaya V. V., Abalymov A. A., Anisimov R. A., Drozd D. D., Drozd A. V., Novikova A. S., Lomova M. V., Zakharevich A. M., Goryacheva I. Yu., Goryacheva O. A. Visualization of 2D and 3D tissue models via size-selected aqueous AgInS/ZnS quantum dots. *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, 2024, vol. 16, iss. 31, pp. 40483–40498. <https://doi.org/10.1021/acsmi.4c05681>
14. Anusiya G., Jaiganesh R. A review on fabrication methods of nanofibers and a special focus on application of cellulose nanofibers. *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, 2022, vol. 4, art. 100262. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100262>
15. Shabunina A. Yu., Volokovoinova L. D., Kozhevnikov I. O., Zaitsev D. P., Terin D. V., Saveleyeva M. C., Rusanova T. Yu., Serdobintsev A. A., Demina P. A. Study of the influence of electrospinning conditions on the characteristics of non-woven material based on fluoroplastic F42L. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 151–162 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-151-162>
16. Chinnappan B., Krishnaswamy M., Xu H., Hoque M. Electrospinning of biomedical nanofibers/nanomembranes: Effects of process parameters. *Polymers*, 2022, vol. 14, iss. 18, art. 3719. <https://doi.org/10.3390/polym14183719>
17. Cho Y., Baek J., Sagong M., Ahn S., Nam J., Kim I.-D. Electrospinning and Nanofiber Technology: Fundamentals. Innovations. and Applications. *Materials*, 2025, vol. 37, iss. 28, art. 2500162 <https://doi.org/10.1002/adma.202500162>
18. Olomskaya V. V., Goryacheva I. YU. Effect of doxorubicin on the fluorescent properties of $\text{AgInS}_2\text{/ZnS}$ quantum dots in water and blood plasma. *Metody kompyuternoy diagnostiki v biologii i meditsine – 2024: Sbornik statey Vserossiyskoy shkoly-seminara* [Skripal' An. V., ed. Methods of Computer Diagnostics in Biology and Medicine – 2024. Collection of articles from the All-Russian School-Seminar]. Saratov, Idatel'stvo "Saratovskiy Istochnik", 2024, pp. 159–159 (in Russian). EDN: EELUGM
19. Raevskaya A., Lesnyak V., Haubold D., Dzhagan V., Stroyuk O., Gaponik N., Zahn D. R. T., Eychmuller A. A Fine Size Selection of Brightly Luminescent Water-Soluble Ag-In-S/ZnS Quantum Dots. *J. Phys. Chem. C*, 2017, vol. 121, iss. 16, pp. 9032–9042. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b00849>
20. Roy D., Routh T., Asaithambi A. V., Mandal S., Mandal P. K. Spectral and temporal optical behavior of blue-, green-, orange-, and red-emitting CdSe -based Core/Gradient alloy shell/Shell quantum dots: Ensemble and single-particle investigation results. *J. Phys. Chem. C*, 2016, vol. 120, iss. 6, pp. 3483–3491. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10051>
21. Zhong H., Zhou Y., Ye M., He Y., Ye J., He C., Yang C., Li Y. Controlled synthesis and optical properties of colloidal ternary chalcogenide CuInS_2 nanocrystals. *Chem. Mater.*, 2008, vol. 20, iss. 20, pp. 6434–6443. <https://doi.org/10.1021/cm8006827>

Поступила в редакцию 11.09.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 10.10.2025; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 11.09.2025; approved after reviewing 07.10.2025; accepted for publication 10.10.2025; published 30.06.2026



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 175–184
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 175–184
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-175-184>, EDN: QYOLXM

Научная статья
УДК 621.3.032.213

Прогностическая оценка скорости испарения бария с поверхности металлопористого термокатода: математическая модель на основе экспериментальных данных для катодов В- и М-типов

О. Е. Глухова^{1,2,3}, Т. М. Крачковская², А. А. Петрунин¹✉

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

²АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз», Россия, 410033, г. Саратов, ул. Панфилова И. В., д. 1А

³Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Россия, 119991, г. Москва, ул. Большая Пироговская, д. 2, стр. 4

Глухова Ольга Евгеньевна, доктор физико-математических наук, ¹заведующий кафедрой радиотехники и электродинамики; ²старший научный сотрудник лаборатории № 2 НПК-12; ³ведущий научный сотрудник лаборатории биомедицинских нанотехнологий, glukhovaoe@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5670-2058>, AuthorID: 33028

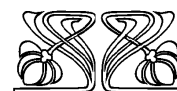
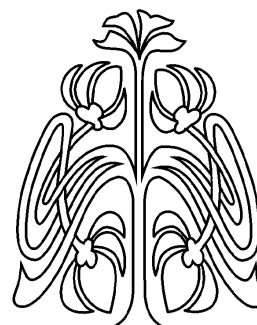
Крачковская Татьяна Михайловна, кандидат технических наук, начальник лаборатории № 2 НПК-12, elektron.t@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9348-6219>, AuthorID: 792681

Петрунин Александр Алексеевич, старший преподаватель кафедры радиотехники и электродинамики, sacha.petrynin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2531-0131>, AuthorID: 1158793

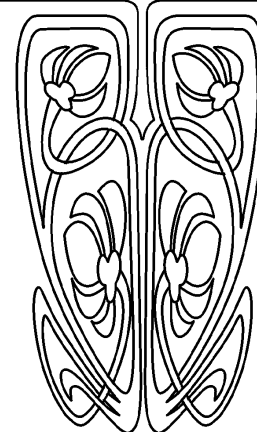
Аннотация. Проведен анализ экспериментально установленных закономерностей скорости испарения бария как основного компонента активного вещества с поверхности катодов В- и М-типа. На этой основе разработана прогностическая методика оценки скорости испарения. Её теоретическую основу составляют формула Ленгмюра для скорости потери массы вещества и уравнение Клайперона–Клаузиуса. Методика позволяет найти характеристический набор параметров для рассматриваемого типа катода: p_0 – давление, T_0 – температуру, q – энергию активации. Эффективность методики доказана предсказанием зависимости скорости испарения бария от температуры для ряда катодов В- и М-типа, при этом погрешность воспроизведения экспериментальных данных составила не более 15%. Впервые проведено моделирование зависимости скорости испарения бария от температуры $G(T)$ для катода М-типа с углероном (сульфоаддуктом нанокластеров углерода) в составе активного вещества в диапазоне концентраций 0–0.4 мас.%. Установлено, что с увеличением концентрации углерона скорость испарения активного вещества снижается.

Ключевые слова: металлопористый катод, скорость испарения, активное вещество, барий, углерон, метод дифференциальной эволюции

Для цитирования: Глухова О. Е., Крачковская Т. М., Петрунин А. А. Прогностическая оценка скорости испарения бария с поверхности металлопористого термокатода: математическая модель на основе экспериментальных данных для катодов В- и М-типов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 175–184. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-175-184>, EDN: QYOLXM



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект № FSRR-2026-0006).

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

Article

Predictive evaluation of barium evaporation rate from the surface of a porous metal thermionic cathode: A mathematical model based on experimental data for B- and M-type cathodes

O. E. Glukhova^{1,2,3}, T. M. Krachkovskaya², A. A. Petrunin¹✉

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

²Joint Stock Company Research and Production Enterprise Almaz, 1A I. V. Panfilov St., Saratov 410033, Russia

³I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, 2–4 Bolshaya Pirogovskaya St., Moscow 119991, Russia

Olga E. Glukhova, glukhovaoe@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5670-2058>, AuthorID: 33028

Tatiana M. Krachkovskaya, elektron.t@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9348-6219>, AuthorID: 792681

Alexander A. Petrunin, sacha.petrynin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2531-0131>, AuthorID: 1158793

Abstract. Background and Objectives: Based on the analysis of experimental studies regarding the evaporation rate patterns of the main component of the active substance – barium – from the surface of B- and M-type cathodes, a methodology for the predictive evaluation of its evaporation rate has been developed. **Materials and Methods:** The theoretical foundation of this methodology comprises the Langmuir formula for the rate of mass loss and the Clausius-Clapeyron equation. **Results:** The methodology yields a characteristic set of parameters for a given cathode type: p'_0 (pressure), T_0 (temperature), and q (activation energy). The effectiveness of the methodology has been demonstrated by predicting the temperature dependence of the barium evaporation rate for several B- and M-type cathodes, with the error in reproducing experimental data not exceeding 15%. New dependencies for the barium evaporation rate $G(T)$ have been obtained for M-type cathodes containing uglexon (a sulfo-adduct of carbon nanoclusters) within the active substance in the concentration range of 0–0.4 wt%. It has been established that the evaporation rate of the active substance decreases with an increase in uglexon concentration. **Conclusion:** The developed methodology is promising for predicting the application of new nanomaterials in the composition of active substances for various types of thermionic cathodes.

Keywords: porous metal cathode, evaporation rate, barium active substance, uglexon, differential evolution method

Acknowledgements: The work was supported the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment (project No. FSRR-2026-0006).

For citation: Glukhova O. E., Krachkovskaya T. M., Petrunin A. A. Predictive evaluation of barium evaporation rate from the surface of a porous metal thermionic cathode: A mathematical model based on experimental data for B- and M-type cathodes. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 175–184 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-175-184>, EDN: QYOLXM

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

Введение

Металлопористые термокатоды (МПК) являются широко востребованными источниками электронов для различных современных электровакуумных приборов (ЭВП), таких как лампы бегущей волны, клистроны, гиротроны [1, 2]. В зависимости от назначения ЭВП к МПК предъявляются различные требования по плотности эмиссионного тока и его стабильности во времени (долговечности), которые зависят от работы выхода электронов и скорости испарения активного вещества (в основном бария) с поверхности катода [3]. С целью оптимизации работы катода и повышения его эффективности на протяжении нескольких десятилетий до настоящего времени конструкции МПК совершенствуются путем применения различных материалов для металлической матрицы, составов активного вещества и эмитирующей поверхности [3–5]. Наиболее широко известными и исследованными в настоящее время конструкциями являются

катоды В-типа, имеющие пористую вольфрамовую основу, пропитанную активным веществом на основе окислов бария, кальция и алюминия в различных молярных соотношениях, и катоды М-типа, аналогичной конструкции, дополнительно имеющие на своей эмитирующей поверхности пленку металла/металлов платиновой группы толщиной порядка 0.5 мкм [6, 7].

Для катода В-типа установлены основные эмпирические закономерности как влияния конструктивных параметров катодной металлической матрицы (плотности или пористости), так и начальной концентрации и состава активного вещества на скорость испарения бариевой компоненты [6, 8]. Для катодов М-типа закономерности влияния рассматриваемых параметров, качественно совпадая с данными для катодов В-типа, имеют более сложные зависимости, так как на скорость испарения дополнительно влияют состав и толщина эмиссионной пленки металла/металлов платиновой группы [9–11].



Практический интерес представляет выявление подобных закономерностей для новых модификаций катодов М-типа, например, с посадкой перспективных нанокластеров углерода (углерона) и полиэдральных фуллереноподобных тороидальных структур (часто называемых в русскоязычной литературе астраленами), обладающих высокой долговечностью [12]. Для решения этой проблемы требуются многочисленные экспериментальные исследования зависимости скорости испарения активного вещества не только от конструктивных параметров катода, но и концентрации нанокластера.

Однако вследствие сложности и большой трудоемкости экспериментальных работ их проведение чрезвычайно затруднено. В связи с этим актуальной задачей в области современной вакуумной эмиссионной электроники является разработка универсальной (пригодной для любого типа МПК) оперативной прогностической методики оценки скорости испарения активного вещества с эмитирующей поверхности. Такая методика необходима для достоверного теоретического прогноза долговечности как самих катодов, так и ЭВП, выполненных на их основе. В настоящее время сведения о разработке такой методики в отечественной и зарубежной научной литературе практически отсутствуют.

Данная работа посвящена разработке методики прогностической оценки скорости испарения бария с поверхности, определяемой типом катода и его индивидуальными параметрами – химическим составом, топологией поверхности и энергией активации эмитирующей поверхности. Методика разрабатывается на примере МПК В- и М-типа с целью дальнейшего прогноза долговечности ЭВП.

1. Методика определения скорости испарения бария с поверхности термокатада и его характеристических параметров

Скорость испарения атомов металла G определяется формулой Ленгмюра для интенсивности потери вещества при данной температуре T [13, формула 8.1]:

$$G = p \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}, \quad (1)$$

где p – давление насыщенных паров металла (Па), M – молярная масса испаряющегося вещества (в нашем случае – бария, $M = 137.327$ г/моль), T – температура (К), R – универсальная газовая постоянная.

Давление насыщенных паров p определяется из уравнения Клапейрона-Клаузиуса:

$$\ln p = -\frac{q}{kT} + \text{const}, \quad p = p_0 \exp\left(-\frac{q}{kT}\right), \quad (2)$$

где p_0 – некоторое начальное давление, q – энергия активации (фактически энергия, необходимая для отрыва от поверхности одного атома в процессе испарения, она может быть определена из квантово-механического моделирования), k – постоянная Больцмана. С учётом (1) и (2) выражение для скорости испарения можно записать в следующем виде:

$$G = \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} p_0 \sqrt{\frac{1}{T}} \exp\left(-q \cdot 1.16 \cdot \frac{10^4}{T}\right). \quad (3)$$

В формуле (3) величина q задается в электрон-вольтах, в связи с чем в (3) появляются корректирующие множители. Предположим, что величина p_0 зависит от энергии активации q по экспоненциальному закону:

$$p_0 = p'_0 \exp(bq), \quad (4)$$

где $b = 1.16 \cdot \frac{10^4}{T_0}$. Здесь коэффициент b при величине q приводится к виду показателя экспоненты формулы (3). Выражение для скорости испарения приобретает следующий вид:

$$G = \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} p'_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{T}} \exp\left[q \cdot 1.16 \cdot \left(\frac{10^4}{T_0} - \frac{10^4}{T}\right)\right]. \quad (5)$$

Характеристические параметры термокатада p'_0 и T_0 находятся по экспериментальным данным для значений скорости испарения в зависимости от величины $10^4/T$. Эти параметры являются индивидуальными для каждого типа катода. Энергия активации q зависит от вещества и топологии поверхности, с которой испаряется барий, основной компонент активного вещества.

Таким образом, три параметра p'_0 , T_0 и q являются определяющими для изучаемого термокатада. Для их поиска в данной работе используется метод дифференциальной эволюции Р. Сторна и К. Прайса [14], который позволяет по экспериментальным зависимостям и виду функции (5) подобрать коэффициенты p'_0 , T_0 и q . Это допускающий распараллеливание вычислений параллельный метод прямого (без нахождения производных) поиска минимума функции (в частности, функции (5)), который использует множество из NP D -мерных векторов-параметров (в нашем случае $D = 3$; $NP = 20000$):

$$x_{i,G}, \quad i = 1, 2, \dots, NP, \quad (6)$$



рассматриваемых как «популяция» для каждого «поколения» G . Значение NP – размер «популяции». Он не изменяется в процессе минимизации функции. Начальная «популяция» векторов выбирается случайным образом и должна охватывать всё пространство параметров. Метод дифференциальной эволюции генерирует новые векторы параметров, добавляя взвешенную разницу между двумя векторами популяции к третьему вектору. Авторы метода дифференциальной эволюции назвали эту операцию «мутацией». Для целевого вектора, задаваемого выражением (6), вектор мутации генерируется следующим образом:

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}), \quad (7)$$

где значения случайных индексов $r1$, $r2$, $r3$ принадлежат целочисленному множеству $\{1, 2, \dots, NP\}$; F – коэффициент масштабирования, который варьируется от 0 до 1. Параметры мутированного вектора затем смешиваются с параметрами другого заранее определенного вектора, целевого вектора, чтобы получить так называемый пробный вектор [14, формула (3)]

$$u_{i,G+1} = (u_{1i,G+1}, u_{2i,G+1}, \dots, u_{Di,G+1})$$

по следующему правилу [14, формула (4)]:

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{если } (\text{rand}(j) \leq CR) \\ & \text{или } j = \text{rnbr}(i), \\ x_{ji,G} & \text{если } (\text{rand}(j) > CR) \\ & \text{или } j \neq \text{rnbr}(i), \end{cases} \quad (8)$$

$j = 1, 2, \dots, D.$

В формуле (8) $\text{rand}(j)$ является j -й оценкой генератора случайных чисел с равномерным распределением из промежутка $[0, 1]$; CR – константа смешивания из промежутка $[0, 1]$; $\text{rnbr}(i)$ – случайно выбранный индекс из множества значений $\{1, 2, \dots, D\}$, гарантирующий, что $u_{ji,G+1}$ получит хотя бы один параметр из $v_{ji,G+1}$. Если пробный вектор даёт меньшее значение функции, чем целевой вектор, пробный вектор заменяет целевой в следующем поколении. Эта последняя операция называется «отбором». Каждый вектор «популяции» должен один раз выступать в роли целевого вектора, чтобы в одном поколении произошло NP «соревнований». В качестве параметра сходимости была выбрана величина, равная 0.001, параметр мутации изменялся при каждой новой популяции и находился

в диапазоне от 0.5 до 1, константа рекомбинации CR равна 0.7. Размер популяции в методе дифференциальной эволюции был выбран равным 20000.

Реализация представленной методики определения скорости испарения бария с поверхности катода В-типа демонстрируется на примере обработки экспериментальных данных, опубликованных в работе [8], в частности данных рис. 6–12, 6–13 и 6–17 [8]. На рис. 1 представлены измеренные значения скоростей испарения бария (отдельные фигурные точки) и рассчитанные по ним зависимости (5) – непрерывные кривые. Во вставках показаны данные в логарифмическом масштабе. Рис. 1, а иллюстрирует влияние содержания окиси бария в составе алюмината на скорость испарения бария с пропитанного катода; рис. 1, б – влияние содержания окиси кальция в составе алюмината; рис. 1, в – влияние содержания вольфрамата в прессованном катоде. Ошибка аппроксимации составила 0.5–1%.

Установленные параметры p'_0 , T_0 и q для всех рассмотренных катодов В-типа представлены в табл. 1, где также приведены значения q_{exp} , указанные в работе [8] при демонстрации измеренных зависимостей скорости испарения бария. Кроме того, указана относительная погрешность $|\Delta q|/q_{\text{exp}}$ установленных в данной работе значений энергии активации q по сравнению с q_{exp} . Величина погрешности Δq вычислялась как разность значений для скорости G , полученного в данной работе (5) и приведенного в работе [8] (формула (1–8)). Из данных табл. 1 видно, что погрешность для q находится в пределах ~4–10%. Качественно изменение q для данных на рис. 1, а и 1, б соответствуют характеру изменения q_{exp} [8]. При этом полученные наборы p'_0 , T_0 , q и формула (5) полностью воспроизводят экспериментально полученные скорости G , как отмечалось выше.

Указанный в табл. 1 интервал значений параметров p'_0 , T_0 и q характерен для катодов В-типа. Экспериментально выявленным из этих параметров является энергия активации q , величина которой находится в интервале ~ (3–4.5) эВ [8, 15]. В данной работе были также установлены параметры p'_0 , T_0 и q для катода типа Ва-W, скорость испарения бария для которых определена в работе [16] при значениях температуры 1000, 1050 и 1100°C. Этот катод идентичен катодам В-типа, поэтому установленные для него параметры $q = 3.580$ эВ, $p'_0 = 34.015$ мкПа

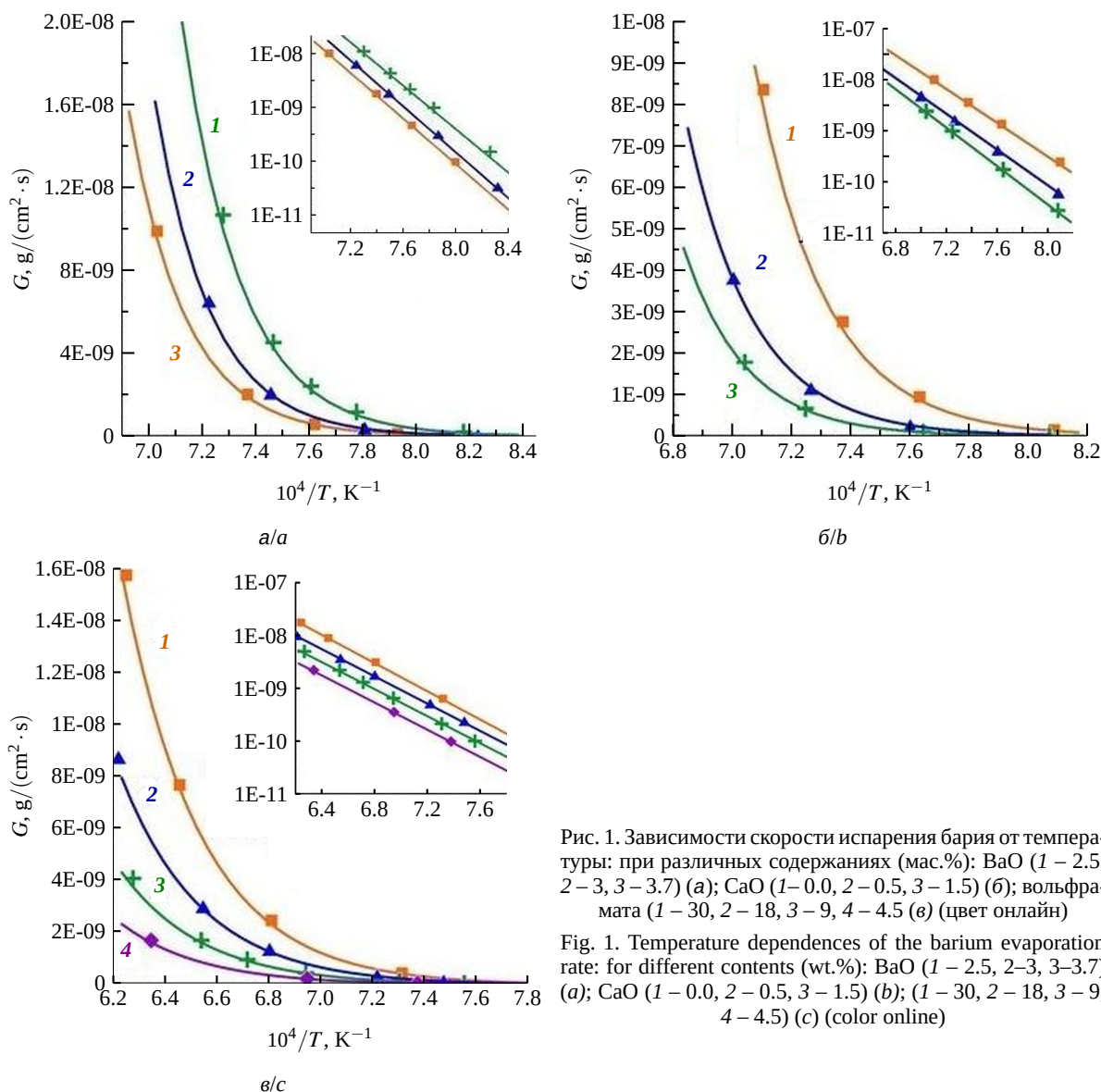


Рис. 1. Зависимости скорости испарения бария от температуры: при различных содержаниях (мас.%) BaO (1 – 2.5, 2 – 3, 3 – 3.7) (а); CaO (1 – 0.0, 2 – 0.5, 3 – 1.5) (б); вольфрамата (1 – 30, 2 – 18, 3 – 9, 4 – 4.5) (в) (цвет онлайн)

Fig. 1. Temperature dependences of the barium evaporation rate: for different contents (wt.%): BaO (1 – 2.5, 2 – 3, 3 – 3.7) (a); CaO (1 – 0.0, 2 – 0.5, 3 – 1.5) (b); (1 – 30, 2 – 18, 3 – 9, 4 – 4.5) (c) (color online)

Таблица 1 / Table 1

Характеристические параметры катодов В-типа и вольфраматных катодов
Characteristic parameters of B-type and tungstate cathodes

мас.% / wt.%	q , eV	q_{exp} [8], eV	$ \Delta q / q_{exp}$, %	p'_0 , μPa	T , K
BaO					
2.5	4.175	3.81	9.58	14.699	1352.4
3.0	4.206	3.96	6.21	12.745	1329.4
3.7	3.923	3.70	6.03	15.176	1296.1
CaO					
0.	3.651	3.81	4.20	6.720	1313.2
0.5	3.902	4.18	6.70	9.305	1382.0
1.5	4.151	4.48	7.37	5.463	1386.1
Вольфрамат					
30	2.936	–	–	3.930	1379.1
18	2.836	–	–	2.225	1379.1
9	2.814	–	–	3.037	1433.2
4.5	2.830	–	–	1.115	1410.2



и $T_0 = 1286.2$ К в целом согласуется с данными табл. 1. Определять погрешность в данном случае некорректно, поскольку технологии создания катодов в работах [8] и [16] различны.

2. Результаты

В работах [10, 11] представлены измеренные с помощью метода пьезокварцевого взвешивания зависимости скорости испарения бариевой компоненты от температуры для катодов М-типа с разной толщиной Os-Ir-Al покрытия (d), пропитанных алюмосиликатом бария-кальция ($3BaO \cdot 0.5CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 0.5SiO_2$) и отличающихся плотностью металлической матрицы ρ . В данной работе детально рассмотрены шесть видов указанных катодов М-типа с позиции поиска закономерностей влияния на скорость испарения плотности материала катода и его состава.

2.1. Построение математической модели для вычисления скорости испарения

Характеристики трех видов катодов (под номерами 1, 2, 3), первоначально отобранных для построения математической модели, представлены в табл. 2 [10]. Выбор этих катодов обусловлен тем, что их химический состав включает весь диапазон рассматриваемых материалов катодов, они имеют одинаковую толщину покрытия d , но отличаются плотностью ρ . С использованием разработанной в п. 1 методики, были обработаны экспериментальные данные для скорости испарения бария с эмиссионной поверхности катодов 1, 2, 3. На рис. 2, а отмечены измеренные значения скорости испарения в эксперименте и приведены теоретически установленные закономерности (5). В табл. 2 представлены полученные характеристические наборы p'_0, T_0, q для катода М-типа [10]. Отклонение аппроксимирующих теоретических зна-

Таблица 2 / Table 2

Характеристические параметры образцов 1–3 катодов М-типа, выявленные на основе измеренных значений скорости испарения

Characteristic parameters of samples 1–3 of M-type cathodes, identified on the basis of measured evaporation rate values

№ катода / Cathode №	$\rho, \text{г/см}^3 / \text{g/cm}^3$	$d, \text{мкм} / \mu\text{m}$	$q, \text{эВ} / \text{eV}$	$p'_0, \text{мкПа} / \mu\text{Pa}$	$T_0, \text{К}$
1	13.85	0.35–0.39	3.058	3.854	1283.9
2	14.05	0.35–0.39	3.506	5.986	1343.2
3	14.22	0.35–0.39	4.312	7.758	1369.3

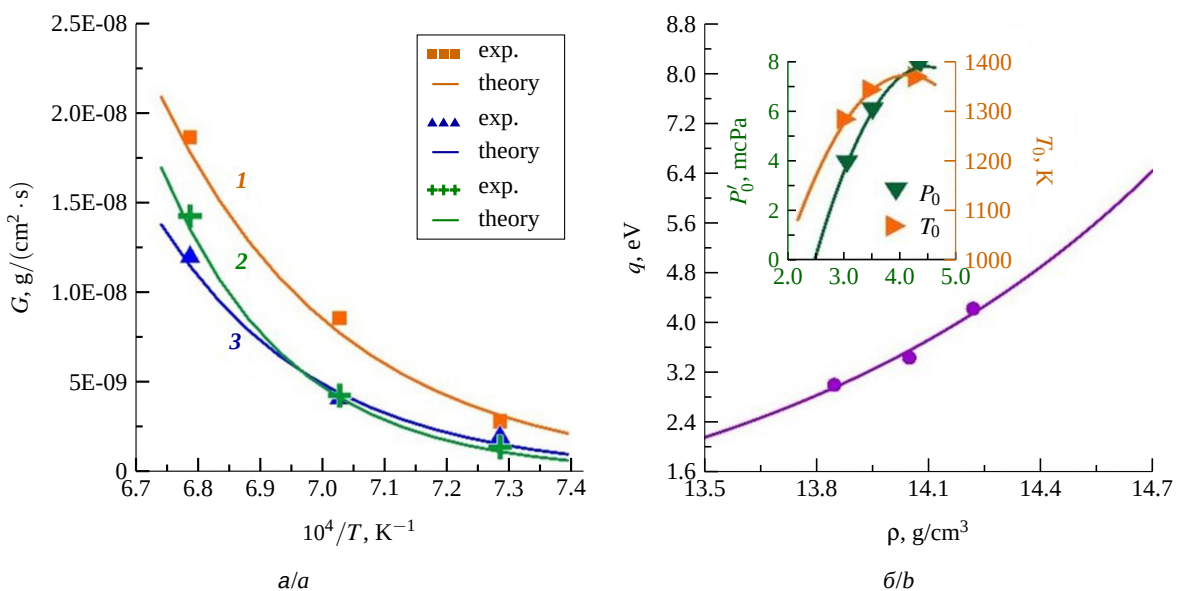


Рис. 2. Зависимости скорости испарения бария с поверхности трех образцов (кривые 1, 2, 3) катодов М-типа от температуры [5] (а); зависимости p'_0, T_0, q от плотности материала катода (б) (цвет онлайн)

Fig. 2. Temperature dependences of the rate of barium evaporation from the surface of three samples (curves 1, 2, 3) of M-type cathodes [5] (a); dependences of p'_0, T_0 and q on the density of the characteristic set (b) (color online)



чений составляет не более 1%. На рис. 2, б демонстрируются аналитические зависимости изменения энергии активации с увеличением плотности материала катода $q(\rho)$; на вставке показаны изменения p'_0 и T_0 как функций энергии активации. Для энергии активации аппроксимирующая экспоненциальная функция имеет вид:

$$\ln q = 0.920 \cdot \ln \rho - 11.659, \quad (9)$$

для p_0 и T_0 – квадратичные функции:

$$p_0 = -32.560 + 18.144 \cdot q - 2.039 \cdot q^2, \quad (10)$$

$$T_0 = -25.080 + 655.336 \cdot q - 79.684 \cdot q^2. \quad (11)$$

2.2. Прогностическая оценка скорости испарения на основе построенной модели для других видов катодов

В рамках той же математической модели (см. п. 2.1) исследуются закономерности скорости испарения для МПК с тем же химическим составом, но с другими плотностью ρ и толщиной покрытия d [11]. В табл. 3 представлены физические параметры катодов с номерами 4, 5 и 6.

На основе выявленных зависимостей (9)–(11) определены тройки параметров p'_0 , T_0 , q характеристического набора для катодов вида 4–6. На основе этих параметров получены аналитические зависимости для скорости испарения G , графики которых демонстрируются на рис. 3. Визуально можно отметить очень небольшое отклонение точек (измеренных значений G) от теоретически выявленных зависимостей (сплошные кривые). Погрешность в каждой точке экспериментально полученной кривой $G(10^4/T)$ составляет 6–15%.

Продемонстрированная эффективность методики позволяет с определенной степенью точности проводить прогностическую оценку изменения скорости испарения бария для образцов вида 1 катода М-типа с толщиной покрытия

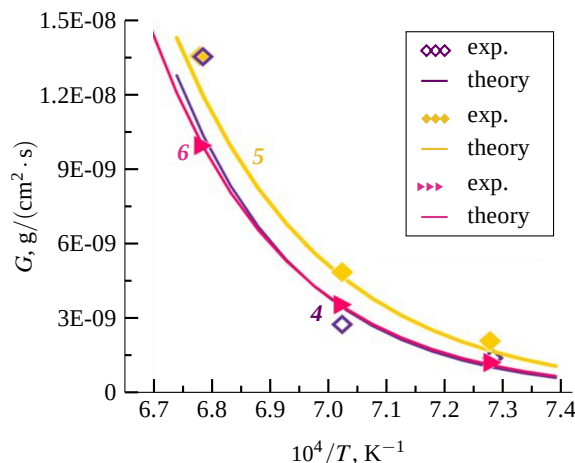


Рис. 3. Зависимость скорости испарения бария с поверхности катода М-типа от температуры для образцов 4–6 [11] (цвет онлайн)

Fig. 3. Temperature dependence of the rate of barium evaporation from the surface of the M-type cathode for samples 4–6 [11] (color online)

0.35–0.39 мкм, отличающихся тем, что в составе алюмосиликата бария-кальция содержится углерон в количестве 0.15–0.40 мас.%.

2.3. Математическая модель и прогностическая оценка скорости испарения для металлопористого катода М-типа с углероном

Материал катодов видов 7 и 8 содержит углерон. Для таких катодов в работе [11] приведены измеренные значения скорости испарения бария для двух значений концентрации $n = 0.15$ и $n = 0.30$ мас.% углерона при одной и той же плотности W-матрицы 13.85 ± 0.01 г/см³ и при одинаковой толщине покрытия в интервале 0.35–0.39 мкм. Значения температуры – 1100, 1150 и 1200°C. С применением методики, описанной в п. 2.1, были рассчитаны параметры q , p'_0 , T_0 для этого типа катода с той же концентрацией углерона (табл. 4).

Далее на основе этих данных построена математическая модель для вычисления скорости испарения бария с поверхности катода

Таблица 3 / Table 3

Рассчитанные характеристические параметры образцов 4–6 катодов М-типа
Calculated characteristic parameters of samples 4–6 of M-type cathodes

№ катода / Cathode No.	ρ , г/см ³ / g/cm ³	d , мкм / μm	q , эВ / eV	p'_0 , мкПа / μPa	T_0 , К
4	14.17	0.35–0.39	4046	7.466	1372.1
5	14.00	0.50–0.60	3.459	5.800	1338.5
6	14.11	0.50–0.60	3.823	7.012	1366.1



Таблица 4 / Table 4

Рассчитанные характеристические параметры катода М-типа с углероном
Calculated characteristic parameters of the M-type cathode with ugleiron

№ катода / Cathode No.	n , мас.% / wt%	q , эВ / eV	p'_0 , мкПа / μ Pa	T_0 , К
7	0.15	3.129	9.467	13544
8	0.30	3.520	1.729	13349

в зависимости от концентрации n углерона в составе матрицы катода. На первом этапе построена функция $q(n)$ посредством экстраполяции в виде ранее определенной экспоненциальной зависимости (9):

$$\ln q = 0.170 \cdot \ln n + 1.463. \quad (12)$$

На втором этапе построены аналитические функции $p'_0(n)$ и $T_0(n)$ на основе квадратичных зависимостей, установленных в п. 2.1:

$$p'_0 = -11.163 \cdot \ln n - 11.711, \quad (13)$$

$$T_0 = -28.075 \cdot \ln n + 1301.1. \quad (14)$$

В рамках данной математической модели проведена прогностическая оценка поведения скорости испарения G для катодов в зависимости от концентрации углерона при постоянной плотности состава W-матрицы $13.85 \pm \pm 0.01$ г/см³. На рис. 4 представлены рассчитанные зависимости для G (точками отмечены

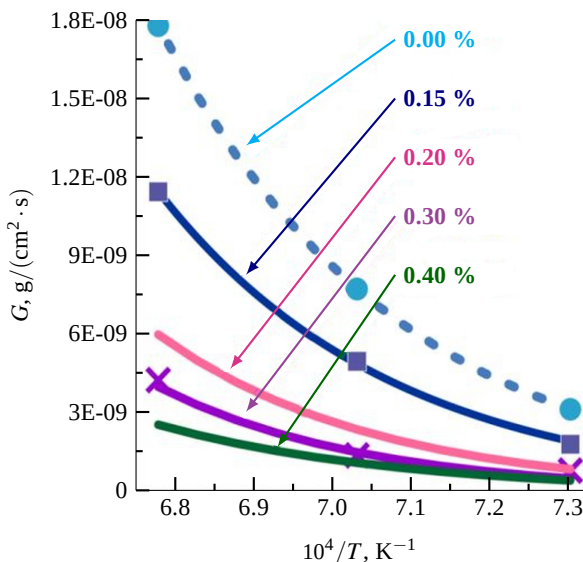


Рис. 4. Зависимость скорости испарения бария от концентрации содержания углерона в составе катода М-типа при одной и той же плотности W-матрицы (цвет онлайн)
 Fig. 4. Dependence of the barium evaporation rate on the carbon concentration in the M-type cathode at a constant W-matrix density (color online)

данные, полученные на основе эксперимента) при различных значениях концентрации – от 0 до 0.40 мас.%.

Из рис. 4 видно, что с увеличением концентрации углерона скорость испарения активного вещества снижается, причем значительное снижение происходит при концентрации 0.2–0.3 мас.%, при дальнейшем увеличении концентрации до 0.4 мас.% снижение становится незначительным.

Выводы

В работе развита и апробирована методика расчета скорости испарения активного вещества катодов В- и М-типов с различными плотностью, топологией и химическим составом поверхности. Для этого получено выражение для скорости испарения в строгом виде (5) без пренебрежения зависимостью коэффициента при экспоненте от температуры. При выводе выражения (5) получен набор параметров p'_0 , T_0 , q , которые характеризуют данный тип катода и определяют давление, температуру и энергию активации. Поиск параметров p'_0 , T_0 , q проводится на основе обработки экспериментальных данных для скорости испарения бария при различных значениях температуры по методу дифференциальной эволюции Р. Сторна и К. Прайса.

Эффективность методики продемонстрирована на примерах:

- предсказания зависимости скорости испарения бария от температуры для нескольких катодов В-типа [8] и М-типа [11] с погрешностью не более 15%;
- расчета набора параметров p'_0 , T_0 , q для катода В-типа [16], свойства которого по результатам расчёта характеристик близки к свойствам рассмотренного в данной работе образца подобного термо катода.

С помощью разработанной методики получены новые зависимости скорости $G(T)$ испарения бария для катода М-типа с углероном в составе активного вещества при различных концентрациях в диапазоне 0–0.4 мас.%. На основе экспериментальных исследований (при фиксированном значении плотности катодной матрицы и концентрации углерона 0.15 и 0.3 мас.%) получены прогностические зависимости $G(T)$ для указанных термокатодов с концентрацией углерона 0.2 и 0.4. Проведенное прогностическое моделирование показывает, что для катодов М-типа, пропитанных алюмосиликатом бария-кальция с присадкой угле-



рона, с увеличением его концентрации скорость испарения бария снижается, причем значительное снижение происходит при концентрации 0.2–0.3 мас.%; при дальнейшем увеличении концентрации до 0.4 мас.% снижение уже незначительно.

Таким образом, разработанная методика перспективна для прогноза применения новых наноматериалов в составе активных веществ разных типов термокатодов.

Список литературы

- Roy A. From radar to high-power weapons: Microwave tubes power modern warfare // *Microwave Journal*. 2024. Vol. 67, № 9. P. 124–128.
- Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends // *IEEE Journal of Microwaves*. 2021. Vol. 1, iss. 1. P. 260–268. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
- Gärtner G., Knapp W., Forbes R. G., eds. *Modern Developments in Vacuum Electron Sources. Topics in Applied Physics*. Cham : Springer, 2020. Vol. 135. XVIII+597 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47291-7>
- Дюбуа Б. Ч., Королев А. Н. Современные эффективные катоды // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. 2011. Вып. 1 (508). С. 5–24.
- Крачковская Т. М., Сахаджи Г. В., Журавлев С. Д. Современные источники электронов для ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // *Журнал радиоэлектроники*. 2017. № 12 [Электронный журнал].
- Козлов В. И. Эмиссионные свойства и долговечность металлопористых катодов для СВЧ приборов // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ*. М. : ЦНИИ «Электроника», 1983. Вып. 8 (541). 54 с.
- Shroff A. M. Review of dispenser cathodes // *Revue Technique Thomson-CSF*. 1991. Vol. 23. P. 948–1026. <https://doi.org/10.5555/151680.151696>
- Кудинцева Г. А., Мельников А. И., Морозов А. В., Никонов Б. П. *Термоэлектронные катоды*. М. ; Л. : Энергия, 1966. 366 с.
- Зябликова А. Н., Некрасов В. И. Некоторые параметры пропитанных катодов, покрытых осмием // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1970. № 7. С. 157.
- Емельянов А. С., Богачев Р. Ю., Журавлев С. Д., Крачковская Т. М., Шестеркин В. И., Шумихин К. В. Исследование скорости испарения активного вещества металлопористого катода методом пьезоэлектрического резонанса // *Вакуумная техника и технологии – 2022 : труды 29-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 21–23 июня 2022 г.) / под ред. Д. К. Кострина, С. А. Марцынкова*. СПб. : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 24–26.
- Емельянов А. С., Крачковская Т. М., Шестеркин В. И., Журавлев С. Д., Биктимирова Г. Р., Шумихин К. В. Влияние технологических параметров и составов пропитки на скорость испарения активного вещества с поверхности металлопористых катодов // 65 лет деятельности на рынке СВЧ-электроники: итоги и современные тенденции : материалы юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Алмаз». Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2022. С. 33–37.
- Крачковская Т. М., Мельников Л. А., Глухова О. Е., Шунаев В. В., Шалаев П. Д. Металлопористые катоды, модифицированные нанокремнеземом, с высокой долговечностью для применения в приборах СВЧ // *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46, вып. 13. С. 36–39. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.13.49593.18315>
- Heaney D. F. Vacuum sintering // *Sintering of Advanced Materials / ed. Z. Z. Fang*. [Amsterdam] : Woodhead Publ., 2010. P. 189–221. <https://doi.org/10.1533/9781845699949.2.189>
- Storn R., Price K. Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // *Journal of Global Optimization*. 1997. Vol. 11, no. 4. P. 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Roquais J. M., Poret F., le Doze R., Ricaud J. L., Monterrin A., Steinbrunn A. Barium depletion study on impregnated cathodes and lifetime prediction // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 215, iss. 1–4. P. 5–17. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00318-0](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00318-0)
- Lai C., Wang J., Zhou F., Liu W., Engelsen D., Miao N. Emission and Evaporation Properties of 75 at% Re-25 at% W Mixed Matrix Impregnated Cathode // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 427. P. 874–882. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.038>

References

- Roy A. From radar to high-power weapons: Microwave tubes power modern warfare. *Microwave Journal*, 2024, vol. 67, no. 9, pp. 124–128.
- Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends. *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, vol. 1, iss. 1, pp. 260–268. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
- Gärtner G., Knapp W., Forbes R. G., eds. *Modern Developments in Vacuum Electron Sources. Topics in Applied Physics*. Springer, Cham, 2020, vol. 135. XVIII+597 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47291-7>
- Dubois B. Ch., Korolev A. N. Modern efficient cathodes. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 2011, iss. 1 (508), pp. 5–24 (in Russian).
- Krachkovskaya T. M., Sahadji G. V., Zhuravlev S. D. Modern electron sources for TWTs in millimeter and submillimeter ranges. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2017, no. 12 (in Russian).
- Kozlov V. I. Emission properties and durability of metal-porous cathodes for microwave devices. *Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 1. Elektronika SVCh* [Reviews on electronic technology. Ser. 1. Microwave Electronics].



- Moscow, Elektronika Central Scientific Research Institute, 1983, iss. 8 (541). 54 p (in Russian).
7. Shroff A. M. Review of dispenser cathodes. *Revue Technique Thomson-CSF*, 1991, vol. 23, pp. 948–1026. <https://doi.org/10.5555/151680.151696>
 8. Kudintseva G. A., Melnikov A. I., Morozov A. V., Nikonov B. P. *Termoelektronnye katody* [Thermoelectronic cathodes]. Moscow, Leningrad, Energiya, 1966. 366 p. (in Russian).
 9. Zyablikova A. N., Nekrasov V. I. Some parameters of impregnated cathodes coated with osmium. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh* [Electronic Engineering. Ser. 1. Microwave Engineering], 1970, no. 7, p. 157 (in Russian).
 10. Emelyanov A. S., Bogachev R. Yu., Zhuravlev S. D., Krachkovskaya T. M., Shesterkin V. I., Shumikhin K. V. Investigation of the evaporation rate of the active substance of a metal-porous cathode by the method of piezoelectric resonance. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologii – 2022: trudy 29-j Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Sankt-Peterburg, 21–23 iyunya 2022 g.)*. Pod red. D. K. Kostrina, S. A. Martsynyukova [Kostrin D. K., Martsynyukov S. A., eds. Vacuum technique and technologies – 2022: Proc. 29th All-Russian Sci.-Tech. Conf. with Int. Participation (St. Petersburg, June 21–23, 2022)]. St. Petersburg, SPbGETU “LETI” Publ., 2022, pp. 24–26 (in Russian).
 11. Emelyanov A. S., Krachkovskaya T. M., Shesterkin V. I., Zhuravlev S. D., Biktimirova G. R., Shumikhin K. V. Influence of technological parameters and impregnation compositions on the evaporation rate of the active substance from the surface of metal-porous cathodes. *65 let deyatel'nosti na rynke SVCh-elektroniki: itogi i sovremennye tendentsii: materialy yubileinoi nauch.-tekhn. konf. AO “NPP ‘Almaz’”* [65 Years of Activity in the Microwave Electronics Market: Results and current trends: Materials of the anniversary sci.-tech. conf. JSC “NPP ‘Almaz’”]. Saratov, Saratov Technical University Press, 2022, pp. 33–37 (in Russian).
 12. Krachkovskaya T. M., Melnikov L. A., Glukhova O. E., Shunaev V. V., Shalaev P. D. Nanocarbon-Modified Metal Porous Cathodes with High Durability for Application in Microwave Devices. *Technical Physics Letters*, 2020, vol. 46, no. 7, pp. 673–676. <https://doi.org/10.1134/S106378502007010X>
 13. Heaney D. F. Vacuum sintering. In: Zhigang Zak Fang, ed. *Sintering of Advanced Materials*. [Amsterdam], Woodhead Publ., 2010, pp. 189–221. <https://doi.org/10.1533/9781845699949.2.189>
 14. Storn R., Price K. Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 1997, vol. 11, no. 4, pp. 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
 15. Roquais J. M., Poret F., Doze R. le, Ricaud J. L., Monterrin A., Steinbrunn A. Barium depletion study on impregnated cathodes and lifetime prediction. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 215, iss. 1–4, pp. 5–17. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00318-0](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00318-0)
 16. Lai C., Wang J., Zhou F., Liu W., Engelsen D., Miao N. Emission and Evaporation Properties of 75 at% Re – 25 at% W Mixed Matrix Impregnated Cathode. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 874–882. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.038>

Поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 07.03.2026; принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 07.03.2026; accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 185–209

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 185–209

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-185-209>, EDN: THDIXH

Научная статья

УДК 621.382.2/.3:004.942

Неустойчивости пространственного заряда и тока в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия



А. И. Михайлов[✉], А. В. Митин

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

Михайлов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела, mikhailovai13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4158-9195>, AuthorID: 127413

Митин Антон Васильевич, старший преподаватель кафедры физики твердого тела, ведущий инженер учебной лаборатории по полупроводниковой электронике, mitin_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9638-427X>, AuthorID: 683539

Аннотация. В работе представлены результаты исследования особенностей колебательных и волновых процессов, протекающих в полупроводниковой структуре на основе полуизолирующего арсенида галлия в условиях локализованного оптического воздействия и с учетом зависимости времени жизни носителей заряда от их избыточной концентрации. Анализируются два вида неустойчивости тока – ганновская и рекомбинационная. Исследования проведены путем численного решения системы уравнений разработанного варианта локально-полевой математической модели, позволяющей адекватно описывать протекающие в изучаемой полупроводниковой структуре электронные процессы. Выявлены, установлены и проанализированы новые данные, касающиеся изучаемых явлений и их функциональных возможностей для практического применения. Делается вывод о перспективности исследованных физических явлений в изучаемых полупроводниковых структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия для создания приборов и устройств функциональной микроэлектроники.

Ключевые слова: дрейфовая нелинейность, концентрационная нелинейность, локально-полевая модель, высокоомный арсенид галлия

Для цитирования: Михайлов А. И., Митин А. В. Неустойчивости пространственного заряда и тока в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 185–209. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-185-209>, EDN: THDIXH

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

Article

Space charge and current instabilities in structures based on semi-insulating gallium arsenide

A. I. Mikhailov[✉], A. V. Mitin

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

Aleksandr I. Mikhailov, mikhailovai13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4158-9195>, AuthorID: 127413

Anton V. Mitin, mitin_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9638-427X>, AuthorID: 683539

Abstract. Background and Objectives: Current instabilities, like many other phenomena in semiconductors and semiconductor structures, are determined by many internal and external factors, which makes it possible to create, using them, either simply all kinds of sensors for various physical effects, or active devices (generation and amplifying), or to provide more complex processing of information signals. Therefore the object of research is to study the features of oscillation and wave processes occurring in a semiconductor structure based on semi-insulating gallium arsenide under localized optical effects and taking into account the dependence of the lifetime of charge carriers on their excess concentration. Two types of current instability are analyzed: Gunn effect and recombination instability. **Materials and Methods:** The research was conducted by numerically solving a system of equations based on a local field mathematical model that adequately describes the electronic processes occurring in the studied semiconductor structure. **Results:** New data have been obtained, established, and analyzed regarding the phenomena under study and their potential for practical applications. **Conclusion:** The research findings suggest that the studied physical phenomena in semiconductor structures based on semi-insulating gallium arsenide have promising applications in the development of functional microelectronics devices.

Keywords: drift nonlinearity, concentration nonlinearity, local field model, high-resistance gallium arsenide



For citation: Mikhailov A. I., Mitin A. V. Space charge and current instabilities in structures based on semi-insulating gallium arsenide. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 185–209 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-185-209>, EDN: THDIXH
This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Неустойчивости тока – замечательный физический феномен, исследования которого наряду с большим научным интересом представляют очевидную особую практическую значимость. Физические механизмы неустойчивости тока в различных физических средах, системах и структурах являются основой для создания активных приборов и устройств, способных усиливать и генерировать электромагнитные колебания и волны в широком диапазоне частот и длин волн, а также осуществлять более сложную и комбинированную обработку информационных сигналов, что может быть основой для создания приборов и устройств функциональной электроники [1–10].

В основе функциональной электроники лежат различные физические явления и эффекты, связанные с возбуждением, распространением и взаимодействием в континуальных средах и структурах на их основе различных динамических неоднородностей (акустических волн, включая поверхностные акустические волны (ПАВ), магнитостатических волн, спиновых волн (магнонов), цилиндрических магнитных доменов, волн пространственного заряда, зарядовых пакетов, доменов электрического поля и пространственного заряда – ганновских и рекомбинационных доменов и др.). Работы в этом направлении активно идут во всем мире с 1970-х гг., и актуальность их не ослабевает (см., например, [11–29]). Смещаются акценты, исследуются разные физические явления, которые могут стать и уже стали физической основой для этого направления, но сама идея функциональной электроники остается очень перспективной и в настоящее время.

Арсенид галлия (GaAs) с 1950-х гг. привлекает внимание исследователей и разработчиков радиоэлектронных и оптоэлектронных приборов, устройств и аппаратуры благодаря ряду уникальных свойств, параметров и характеристик. Различным физическим механизмам возникновения и проявления неустойчивостей тока в GaAs и подобных ему полупроводниках посвящено большое количество исследований, результаты которых к настоящему времени описаны не только в тысячах оригинальных работ, но и уже неоднократно обобщались и подробно анализировались в известных монографиях и статьях,

включая статьи обзорного характера (к примеру, [1, 5, 7, 30–42]). Как и многие другие явления в полупроводниках и структурах на их основе, неустойчивости тока определяются многими внутренними и внешними факторами, что обуславливает либо возможность создания с их использованием просто всевозможных датчиков различных физических воздействий, либо позволяет обеспечивать более сложную обработку информационных сигналов, что по существу предопределяет возможность создания на их основе приборов и устройств функциональной микроэлектроники.

Один только ганновский механизм неустойчивости тока, базирующийся на междолинных электронных переходах в полупроводниках типа GaAs в сильных электрических полях, дал твердотельной электронике много плодотворных физических идей и технических решений, которые воплощены в ряде очень важных и перспективных приборов и устройств, из которых самыми известными являются диоды Ганна, генераторы и усилители СВЧ диапазона на их основе [30, 31, 33, 43, 44]. Неослабевающий интерес к исследованиям в этом направлении позволил предсказать возможность проявления и таких нелинейных явлений, как фоторефрактивный эффект Ганна [45, 46] и спиновый эффект Ганна [47, 48].

Другой известный механизм неустойчивости тока в GaAs – рекомбинационный (другие названия – концентрационный, концентрационная нелинейность) [1, 7, 39, 40] – тоже представляет значительный научный интерес и открывает большие перспективы практического использования: во-первых, при его комбинации с ганновским и другими физическими механизмами; во-вторых, с учетом сильного влияния различных внешних и внутренних факторов (освещение, магнитное поле, характер распределения легирующих примесей полупроводниковых структур и т. д.), которые могут использоваться как факторы управления (в том числе оперативного) и расширения функциональных возможностей разрабатываемых и перспективных приборов и устройств.

Для теоретического анализа динамики пространственного заряда, электрического поля и тока в структурах арсенида галлия используются



различные варианты локально-полевой модели (ЛПМ), температурных моделей и даже моделирование методом Монте-Карло [1, 30, 31, 49–60]. Среди них наиболее известной и чаще всего применяемой является ЛПМ, которая, несмотря на свою относительную простоту, позволяет вполне адекватно описывать и исследовать многие важные явления и процессы, представляющие практический интерес, на частотах до десятков ГГц.

При анализе неустойчивостей тока возникает принципиальная необходимость учета нелинейных режимов, характеризующихся сложным спектром и широким интервалом изменения амплитуд колебательных и волновых процессов. Нахождение аналитических решений модельных уравнений в данном случае становится весьма затруднительным, да и просто невозможным. В связи с этим чаще всего остается лишь одна возможность анализа – численное решение систем уравнений для используемых моделей. Это характерно для моделей, описывающих и ганновскую, и рекомбинационную неустойчивости тока в арсениде галлия и подобных ему многодолиных полупроводниках.

Стоит добавить, что и экспериментальные исследования неустойчивостей тока практически всегда включают анализ сложного частотного спектра тока в условиях влияния большого количества факторов [39, 40, 42, 45, 61, 62].

Как известно (см., например, [51]), в наиболее распространенных вариантах формулировки ЛПМ используется лишь одно материальное уравнение, характеризующее физическую среду, – формула, аппроксимирующая локальную и мгновенную связь средней дрейфовой скорости электронов с напряженностью электрического поля $v_n(E)$ в полупроводнике. Для моделирования даже наиболее высокочастотной ганновской неустойчивости тока в арсениде галлия и подобных ему полупроводниках этого оказывается вполне достаточно, чтобы вполне адекватно описывать происходящие при этом электронные процессы. В ситуациях, требующих включения в анализ концентрационного механизма рекомбинационной неустойчивости тока, становится необходимым учитывать и математически описывать процессы, связанные с кинетикой обмена носителями заряда между разрешенными зонами и глубокими примесными уровнями в запрещенной зоне полупроводника, включая, в частности, рекомбинацию носителей заряда с участием ловушек, а также необходимость

перехода к рассмотрению биполярного случая, т. е. в проводимом анализе в ряде конкретных ситуаций становится принципиальным одновременный учет и электронов, и дырок.

Полуизолирующий арсенид галлия, используемый чаще всего в качестве монокристаллических подложек для наращивания тонких низкоомных эпитаксиальных рабочих слоев полупроводника, в которых происходят основные физические процессы, определяющие принцип действия твердотельного электронного прибора, представляет собой нелегированный или компенсированный полупроводник с повышенным значением удельного сопротивления. Наличие компенсирующих примесей с достаточно высокими значениями концентрации (до 10^{16} – 10^{17} см⁻³ и выше) [63–65] приводит не только к снижению концентрации носителей заряда в зоне проводимости и в валентной зоне до значений 10^{13} см⁻³ и менее (что обеспечивает высокое удельное сопротивление материала, позволяющее называть его полуизолирующим), но и к созданию уровней ловушек в запрещенной зоне, оказывающих значительное влияние на генерационно-рекомбинационные процессы. Модельным параметром, характеризующим темп и особенности динамики генерационно-рекомбинационных процессов, как известно, является время жизни носителей заряда. Ранее в наших работах [39, 55, 66] было установлено, что изменение в модели конкретного значения времени жизни существенно меняет результаты моделирования. Кроме того, известно [67–71], что время жизни может в существенной степени зависеть от концентраций электронов и дырок, которые значительно изменяются в пространстве и во времени в динамическом режиме (в режиме возникновения колебаний пространственного заряда в активной области полупроводникового образца).

В данной работе, следуя общей логике ЛПМ, в дополнение к зависимостям средних дрейфовых скоростей электронов и дырок от напряженности электрического поля при формулировке модели, описывающей динамику пространственного заряда, электрического поля и тока в структурах полуизолирующего арсенида галлия, в модель вводится еще локальная и мгновенная связь времени жизни носителей заряда с концентрацией неравновесных носителей заряда (дырок) $\tau(\Delta p)$, которая через уравнение Пуассона связана с напряженностью электрического поля. Выявляются и анализируются определяемые этим



модельным условием особые элементы динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока.

1. Система уравнений ЛПМ

Наиболее известный вариант локально-полевой математической модели, применяемой в монопольном случае для анализа нелинейной динамики пространственного заряда, электрического поля и тока в структурах арсенида галлия, учитывающий только локальную и мгновенную связь дрейфовой скорости электронов с напряженностью электрического поля $v_n(E)$, подробно описан в ряде работ, включая работы авторов данной статьи [51, 53–55].

В основе этой математической модели лежит классический вариант основных уравнений теории полупроводниковых приборов [72], включающий уравнение непрерывности, уравнение Пуассона и выражение для плотности полного тока с учетом дрейфовой и диффузионной составляющих, а также ток смещения. В пространственно-одномерном случае (x – единственная пространственная координата; t – время) система уравнений модели имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = & -v_n(E(x,t)) \cdot \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} - \\ & -n(x,t) \cdot \frac{\partial v_n(E(x,t))}{\partial x} + \\ & + D_n \cdot \frac{\partial^2 n(x,t)}{\partial x^2} + \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial N_{T-}(x,t)}{\partial t} + G(x) - \frac{\Delta p(x,t)}{\tau(\Delta p(x,t))}, \\ \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = & v_p(E(x,t)) \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + \\ & + p(x,t) \cdot \frac{\partial v_p(E(x,t))}{\partial x} + \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & + D_p \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + G(x) - \frac{\Delta p(x,t)}{\tau(\Delta p(x,t))}, \\ & \frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = \end{aligned}$$

$$= \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} (n(x,t) - N_D(x) + (N_T(x) - N_{T-}(x,t)) - p(x,t)), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} j(t) = & \frac{q}{L} \int_0^L \{ n(x,t) \cdot v_n(E(x,t)) + p(x,t) \cdot v_p(E(x,t)) \} dx + \\ & + \frac{q}{L} \int_0^L \left\{ D_p \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} - D_n \cdot \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} \right\} dx + \\ & + \frac{\epsilon \epsilon_0}{L} \cdot \frac{\partial U(t)}{\partial t}. \end{aligned} \quad (4)$$

Последовательно поясним смысл введенных переменных и обозначений. Здесь $n(x,t)$, $p(x,t)$, $v_n(E(x,t))$, $v_p(E(x,t))$, D_n , D_p – концентрации, дрейфовые скорости и коэффициенты диффузии электронов (индекс n) и дырок (индекс p) соответственно; $E(x,t)$ – напряженность электрического поля; $G(x)$ – пространственная функция, определяющая скорость генерации электронов и дырок при воздействии локализованного освещения; $N_D(x)$ – распределение концентрации мелких доноров по x (профиль легирования структуры) в структуре образца $n^+ - n^- - n - n^+ - \text{GaAs}$.

$\Delta p(x,t)$, $\Delta n(x,t)$ – избыточные неравновесные концентрации дырок и электронов, появляющиеся за счет воздействия освещения, которые принимались одинаковыми, т. е. $\Delta p(x,t) = \Delta n(x,t)$; $\tau(\Delta p(x,t))$ – время жизни дырок (и электронов), зависящее от их избыточной концентрации; $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль заряда электрона; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника (для GaAs $\epsilon = 12.9$); $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума); $N_T(x)$ – распределение полной концентрации примесных центров с глубокими уровнями по координате (в активной области структуры принималось однородным); $N_{T-}(x,t)$ – концентрация незаполненных кулоновских отталкивающих электроны примесных центров с глубокими уровнями (заряженных однократно); L – общая длина структуры $n^+ - n^- - n - n^+ - \text{GaAs}$, размер которой в численных экспериментах данной работы выбирался равным 518 мкм; $j(t)$ – плотность полного тока через образец; $U(t) = \int_0^L E(x,t) dx$ – напряжение на структуре, которое в данной работе принималось постоянным и равным U_0 .

Профиль легирования этой структуры представлен на рис. 1. Обозначение n^+ использовано для областей с повышенным уровнем легирования, которые моделируют омические контакты структуры, где величина концентрации доноров выбирается на порядок больше степени легирования активной n -области. Обозначение n^- применено для области с пониженной концентрацией доноров, часто называемая «зарубкой», она способствует локализации участка формирования динамических неоднородностей в непосредственной близости от катодного контакта структуры. На участках наиболее резкого изменения концентрации легирующей примеси профиль

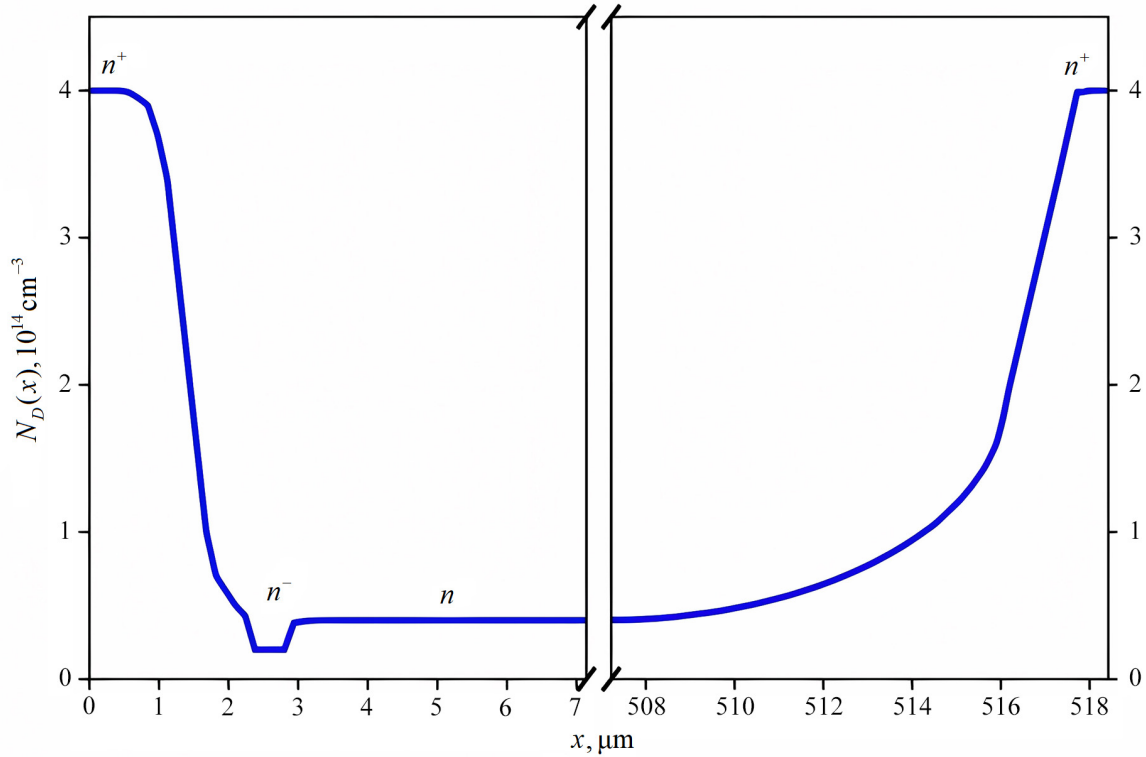


Рис. 1. Профиль легирования исследуемой структуры [55]
 Fig. 1. The doping profile of the studied structure [55]

легирования математически выражается сшитыми в точках перегибов по величинам $N_D(x)$ и по величинам первой производной $\frac{dN_D(x)}{dx}$ функциями 2-го порядка.

Дрейфовые скорости электронов и дырок считались локальными и мгновенными функциями напряженности электрического поля и с учетом зависимости их знака от направления электрического поля в выбранной одномерной системе координат задавались следующими аппроксимирующими выражениями на основе известных литературных данных [73, 74]:

$$\begin{aligned} v_n(E) &= \text{sign}(E) \cdot \left\{ \frac{\mu_n |E| + v_s (E/E_{ap})^4}{1 + (E/E_{ap})^4} \right\}, \\ v_p(E) &= \text{sign}(E) \cdot \left\{ \frac{\mu_p |E|}{1 + \mu_p |E|/v_s} \right\}, \\ \text{sign}(E) &= \begin{cases} 1, & E \geq 0, \\ -1, & E < 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mu_n = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $\mu_p = 400 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $v_s = 0.8 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, $E_{ap} = 3.8 \text{ кВ/см}$ – параметры аппроксимации зависимостей для GaAs при температуре 300 К [75–77]. Коэффициенты

диффузии электронов и дырок полагались постоянными и равными 300 и 10 $\text{см}^2/\text{с}$ соответственно [51, 76–78].

Приведенная система уравнений должна быть дополнена уравнением, описывающим кинетику заполнения-освобождения электронами глубоких уровней ловушек:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{T-}(x,t)}{\partial t} &= g(N_T(x) - N_{T-}(x,t)) - \\ &- c_n(E(x,t))n(x,t) \cdot N_{T-}(x,t) \end{aligned} \quad (6)$$

где $g(N_T(x) - N_{T-}(x,t))$ – скорость (темп) процесса теплового возбуждения электронов с двукратно отрицательно заряженных центров; g – обратное время тепловой генерации, характеризующее вероятность возбуждения электрона с заполненного уровня. $c_n(E(x,t))$ – коэффициент захвата электрона однократно отрицательно заряженным примесным центром, являющийся локальной и мгновенной функцией напряженности электрического поля и задаваемый выражением [79]:

$$c_n(E) = c_0 \left[1 + 9 \frac{\left(\frac{E}{E_{ap1}} \right)^4}{1 + \left(\frac{E}{E_{ap1}} \right)^4} \right], \quad (7)$$



где c_0 – упомянутый выше коэффициент захвата в отсутствие электрического поля; $10c_0$ – максимальное значение, к которому стремится коэффициент захвата электрона, преодолевшего кулоновский потенциальный барьер примесного центра, в сильных электрических полях; $E_{ap1} = 2.1$ кВ/см – параметр аппроксимации.

Для решения задачи из физических соображений формулировались начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} E(x, 0) &= \frac{U_0}{L}, \\ n(x, 0) &= N_D(x), N_{T-}(x, 0) = N_T, \\ p(x, 0) &= 0, j(0) = 0 \end{aligned}$$

(начальные условия);

$$\begin{aligned} n(0, t) &= N_D(0), n(L, t) = N_D(L), \\ E(0, t) &= E(L, t) = E_c, p(0, t) = p(L, t) = 0, \end{aligned}$$

(граничные условия),

где E_c – напряженность электрического поля на контактах, величина которой определяется в ходе численных экспериментов при напряжении U_0 для каждого из образцов определенной длины с заданной степенью легирования и в конкретных случаях принимается равной по величине в интервале от 100 до 500 В/см. Заметим, что изменение величины E_c в пределах $\pm 20\%$ от выбираемых величин не меняет результатов численного эксперимента, что является свидетельством хорошей устойчивости алгоритма. Кроме того, будем считать, что $\int_0^L E(x, t) dx = U_0$.

Локальное освещение части активной области структуры в формулируемой модели описывалось заданием пространственного распределения интенсивности светового возбуждения вдоль освещаемой области конечной ширины d посредством введения функции $G(x)$, определяющей скорость генерации электронов и дырок светом и принимаемой одинаковой для электронов и дырок (т. е. полагалось, что электроны и дырки при генерации рождаются парами):

$$G(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < x_0 - \frac{d}{2}, \\ G_{\max} \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \cdot \frac{(x - x_0)}{d} \right) \right], & \text{при } x_0 - \frac{d}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{d}{2}, \\ 0, & \text{при } x > x_0 + \frac{d}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

где x_0 – координата середины освещаемой области, d – ширина, освещаемой области (принималась равной 98 мкм), G_{\max} – максимальное значение функции $G(x)$, соответствующее середине освещаемой области (в каждой серии численных экспериментов принималось постоянным). Численное моделирование проводилось для трех вариантов локализации освещаемой области: в прикатодной, центральной и прианодной частях активной области структуры. Ширина освещаемой области d , ее локализация x_0 и максимальное значение функции оптической генерации G_{\max} выбирались из физических соображений и определялись характеристическими параметрами процессов, происходящих в структуре. В частности, ширина освещаемой области должна соотноситься с размерами формирующихся доменов сильного поля, а ее граница должна располагаться внутри активной области на некотором расстоянии от $n^+ - n^-$ переходов, определяемом диффузионной длиной неравновесных носителей заряда.

Предварительные численные эксперименты, проведенные при нескольких различных значениях времени жизни с использованием модели ЛПМ [39, 40, 55, 66], учитывающей линейную рекомбинацию (при постоянном времени жизни), позволили установить параметры модели, при которых концентрация неравновесных дырок для различных вариантов локализации освещаемой области во всем диапазоне рабочих напряжений в большей части активной области структуры оказывается существенно меньше концентрации свободных электронов и является величиной, лимитирующей темп процесса рекомбинации. Поэтому в отличие от предыдущих работ авторов [39, 40, 55, 66] в варианте модели, используемом в этой работе, время жизни неравновесных дырок и электронов считалось не постоянным, а задавалось функцией от избыточной концентрации дырок Δp как

$$\tau(\Delta p) = \tau_{\max} - (\tau_{\max} - \tau_{\min}) \cdot \frac{\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{app}} \right)^2}{1 + \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{app}} \right)^2}, \quad (9)$$

где τ_{\max} , τ_{\min} , Δp_{app} – параметры аппроксимации. Значения времени жизни τ_{\max} и τ_{\min} выбирались на основе известных литературных данных для полуизолирующего GaAs [80–83]. Конкретные численные значения τ_{\max} и τ_{\min} приведены



в последующих разделах статьи. Предварительные численные эксперименты при постоянном значении времени жизни $\tau = \tau_{\max}$ позволяли определить максимальное значение концентрации неравновесных дырок Δp_{\max} , которое далее использовалось для выбора значения параметра аппроксимации Δp_{app} . Значение Δp_{app} выбиралось таким образом, чтобы на аппроксимирующей зависимости $\tau(\Delta p)$ при $\Delta p \approx \Delta p_{\max}$ достигались значения времени жизни, близкие к τ_{\min} .

2. Особенности алгоритма численного решения системы уравнений ЛПМ

Алгоритм численного решения системы дифференциальных уравнений ЛПМ (1)–(9) основывается на методе конечных разностей – замене исходных дифференциальных уравнений конечно-разностными уравнениями для сеточных функций концентраций электронов n_i^j и дырок p_i^j , концентрации незаполненных ловушек N_{T-i}^j и напряженности электрического поля E_i^j на пространственно-временной сетке (узлы сетки x_i и t^j) с последующим вычислением сеточных функций плотности тока j^j и напряжения на структуре U^j . Шаги по времени h_t и по координате h_x выбирались из условия обеспечения устойчивости получаемого численного решения и были меньше соответствующих характеристических величин: максвелловского времени релаксации τ_M , времени жизни неравновесных носителей заряда τ , дебаевской длины экранирования и диффузионной длины неравновесных носителей. В каждой серии численных экспериментов шаги по времени и по координате принимались постоянными. Распределение концентрации мелких доноров (профиль легирования) вдоль структуры $n^+ - n^- - n - n^+ - \text{GaAs}$ задавалось отдельной сеточной функцией N_D ; концентрация легирующей примеси в высоколегированных n^+ -областях составляла $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; в n^- -области с пониженной концентрацией доноров («зарубке») задавалась равной $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; в активной n -области – $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 1). При этом длина активной области структуры – порядка 500 мкм. Аппроксимация на сетке уравнений непрерывности для электронов и дырок с использованием Т-образного шаблона приводила к неявным конечно-разностным схемам. Получаемые системы линейных алгебраических уравнений с трехдиагональными матрицами коэффициентов решались численно методом прогонки. При численном решении уравнения Пуассона и уравнения, описывающего кинетику

заполнения-освобождения электронами глубоких уровней ловушек, использовались схемы бегущего счета. Задача решалась в режиме заданного постоянного напряжения $U = U_0$.

3. Обсуждение результатов математического моделирования

В исследованиях [39, 40, 55, 66, 84], проведенных с использованием разработанной авторами локально-полевой математической модели, было установлено, что даже в предположении постоянства времени жизни неравновесных носителей заряда τ (в условиях линейной рекомбинации) изменение величины времени жизни может приводить к существенным изменениям характера динамики пространственного заряда, электрического поля и тока в структурах $n^+ - n^- - n - n^+ - \text{GaAs}$ (на основе полуизолирующего n -GaAs) как при учете механизма только ганновской неустойчивости тока, так и при одновременном учете ганновского и рекомбинационного механизмов развития неустойчивости тока (при доминировании второго) в условиях локализованного воздействия на активную область структуры излучения из диапазона длин волн, соответствующего собственному поглощению арсенида галлия. Было показано, что наиболее сложные и интересные изменения в характере динамики носителей заряда, электрического поля и, соответственно, в спектре генерируемых колебаний тока, обусловленные изменением постоянного приложенного напряжения и величины τ , возможны в условиях локализованного освещения центральной части активной области структуры.

Для уточнения и более адекватного и подробного исследования закономерностей указанных изменений в данной работе проведен детальный анализ особенностей проявления ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в исследуемых структурах на основе варианта ЛПМ, определяемой уравнениями (1)–(8), при различных фиксированных значениях времени жизни в условиях локализованного освещения центральной части активной области структуры. Значения времени жизни, используемые в численных экспериментах, выбирались на основе известных литературных данных для арсенида галлия [80–83], а также с учетом результатов предыдущих работ авторов [39, 40, 55, 66, 84] и, в частности, задавались в интервале $\tau = 1\text{--}10 \text{ нс}$ при исследовании ганновской и $\tau = 10\text{--}17 \text{ нс}$ для случая рекомбинационной неустойчивостей тока.



С другой стороны, известно, что время жизни неравновесных носителей заряда в полупроводнике не является постоянной величиной и зависит от различных физических факторов [67, 80], таких как концентрация примесных центров с глубокими энергетическими уровнями, глубина их залегания в запрещенной зоне полупроводника, избыточные концентрации электронов и дырок. Время жизни может в существенной степени определяться концентрациями неравновесных электронов и дырок, которые значительно меняются в пространстве и во времени в динамическом режиме (в режиме возникновения колебаний пространственного заряда в активной области полупроводникового образца).

Поэтому в данной работе дальнейший анализ динамики электронных процессов в исследуемых структурах на основе полуизолирующего GaAs проводился, в отличие от предыдущих работ, с учетом зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от концентрации дырок, генерируемых светом (9).

3.1. Ганновская неустойчивость тока

При проведении данной серии численных экспериментов модельные параметры выбирались следующим образом. Шаги по времени и координате принимались постоянными и равными $h_t = 0.46$ пс и $h_x = 0.14$ мкм соответственно. Максимальное значение функции оптической генерации в (8) составляло $G_{\max} = 10^{20}$ см⁻³ с⁻¹. Значения τ_{\max} и τ_{\min} в (9) выбирались на основе известных данных для полуизолирующего GaAs [80] и с учетом результатов предшествующих работ авторов [39, 40, 55, 66], $\tau_{\max} = 10$ нс, $\tau_{\min} = 1$ нс. На основе численных экспериментов было определено оптимальное значение параметра $\Delta p_{app} = 3 \cdot 10^{10}$ см⁻³ в (9), которое использовалось в последующих численных экспериментах.

Численное моделирование с использованием ЛПМ (1)–(8) нелинейной динамики пространственного заряда, электрического поля и тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия при различных фиксированных значениях времени жизни неравновесных носителей заряда в условиях проявления ганновской неустойчивости и локализованного оптического воздействия на центральную часть активной области структуры показало, что для каждого задаваемого значения времени жизни из анализируемого интервала $\tau = 1$ –10 нс в структуре возможно установление

двух характерных устойчивых различающихся режимов динамики электронных процессов [39, 40, 66]: в режиме I в каждом периоде колебаний дипольный домен, возникающий в левой (относительно освещаемой области) части структуры, не успевает развиться, доходя до освещаемой области, и разрушается в ней (рис. 2, а, б); в режиме II дипольный домен развивается, оказывается способным преодолеть освещаемую область и достигает анода; в обоих режимах практически синхронно с возникновением дипольного домена происходит образование обогащенного слоя в правой части структуры, который впоследствии также достигает анода (рис. 2, в, г).

Переход структуры из одного режима в другой происходит при достижении некоторого определенного значения приложенного напряжения U_{0r} и сопровождается существенными изменениями на зависимостях $f(U_0)$, $j_0(U_0)$, $j_1(U_0)$, $j_2(U_0)$ (рис. 3). Установлено, что в анализируемом интервале значений времени жизни $\tau = 1$ –10 нс U_{0r} немонотонно зависит от времени жизни (рис. 4).

В интервале значений $\tau = 1$ –3 нс при увеличении времени жизни наблюдается уменьшение U_{0r} , что обусловлено уменьшением влияния рекомбинационных процессов на динамику пространственного заряда при сопоставимости времени жизни неравновесных носителей заряда и времени, определяющего пролет дипольного домена через освещаемую область и прилегающие к ней области с повышенной концентрацией неравновесных носителей заряда.

В интервале значений $\tau = 4$ –10 нс происходит увеличение U_{0r} при увеличении времени жизни, что обусловлено увеличением дрейфового и диффузионного смещения неравновесных носителей заряда за пределы освещаемой области (изменением ее эффективной ширины), приводящим к перераспределению электрического поля между этой областью и остальными частями структуры, что является причиной наблюдающегося уменьшения частоты генерируемых колебаний тока при увеличении времени жизни в указанном интервале.

Дальнейший анализ результатов проведенных численных экспериментов показал, что влияние зависимости $\tau(\Delta p)$ (9) на спектральный состав генерируемых колебаний тока оказывается наиболее существенным при условии локализации освещаемой области в центральной (рис. 5) или прианодной (рис. 6) частях исследуемой структуры и имеет выраженный характер

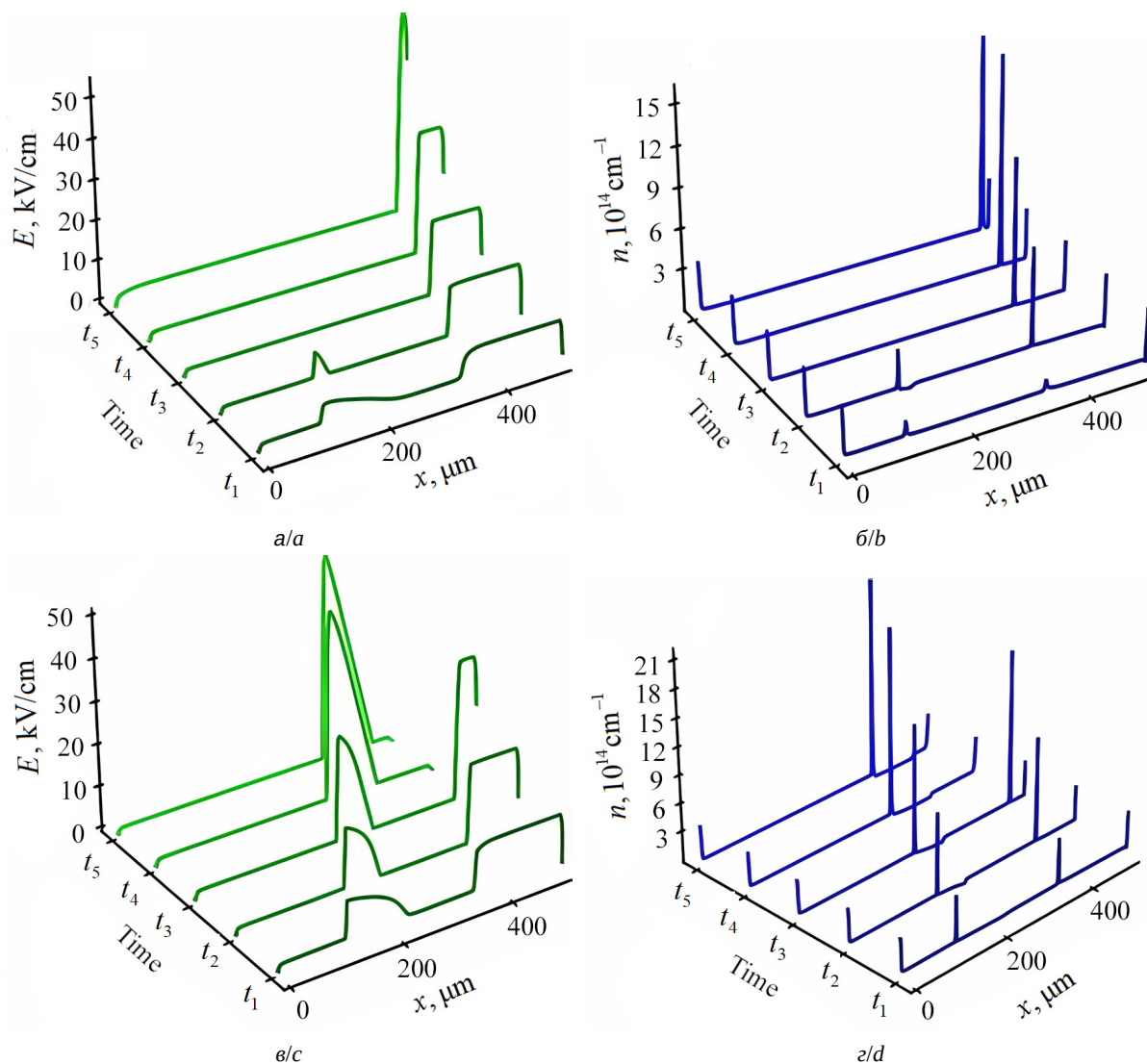


Рис. 2. Пространственные распределения электрического поля и концентрации электронов в структуре в различные моменты времени при $\tau = 10$ пс, соответствующие напряжениям $U_0 = 250 \text{ В}$ (а, б) и $U_0 = 320 \text{ В}$ (в, з) (цвет онлайн)
 Fig. 2. Spatial distributions of the electric field and electron concentrations in the structure at different time points at $\tau = 10$ ns, corresponding to voltages $U_0 = 250 \text{ V}$ (a, b) and $U_0 = 320 \text{ V}$ (c, d) (color online)

в определенном интервале рабочих напряжений (170–260 В).

Анализ динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и плотности полного тока в условиях локализованного освещения центральной части активной области структуры показал, что при учете зависимости $\tau(\Delta p)$ (9) в указанном диапазоне напряжений наблюдается заметное изменение соотношения скоростей нарастания поля в двух динамических неоднородностях, одновременно формирующихся в различных частях активной области структуры: первая неоднородность – обогащенный слой в прикатодной области структуры, преобразующийся в процессе движения в домен сильного

поля; вторая неоднородность – обогащенный слой в правой относительно освещаемой части активной области структуры.

Численное моделирование позволило установить, что при локализованном освещении структуры вблизи анода на характер динамики электронных процессов при учете зависимости времени жизни от концентрации неравновесных дырок (9) оказывают влияние два физических фактора:

- 1) изменение времени жизни вдоль активной области структуры может приводить к значительным изменениям характеристических длин, определяющих дрейфовое и диффузионное смещение неравновесных носителей

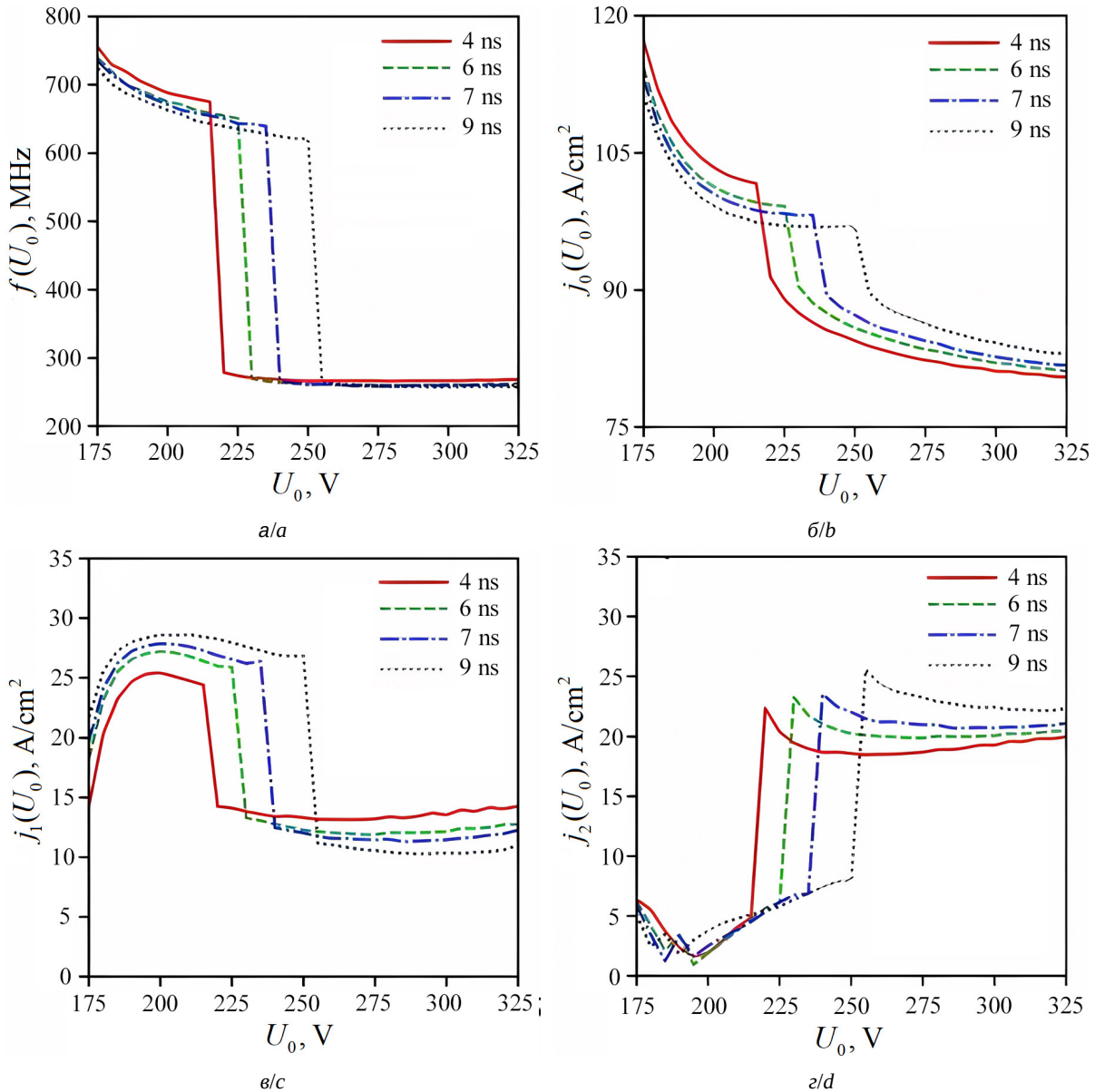


Рис. 3. Зависимости: частоты f (а), постоянной составляющей j_0 (б), амплитуд основной j_1 (в) и второй j_2 (г) гармоник плотности тока от величины приложенного постоянного напряжения U_0 при различных значениях τ (цвет онлайн)

Fig. 3. The dependences of the frequency f (a), constant component j_0 (b), and amplitudes of the main j_1 (c) and the second j_2 (d) harmonics of the current density on the magnitude of the applied DC voltage U_0 at different values of τ (color online)

заряда из освещаемой области, а также их концентрации в этой области, что приводит к перераспределению электрического поля между этой областью и остальными частями структуры;

- 2) при сопоставимости времени жизни и характеристических времен, определяющих формирование и прохождение через активную область структуры (и отдельные ее части) динамических неоднородностей (главным образом – дипольных доменов), происхо-

дит увеличение влияния рекомбинационных процессов на динамику заряда и тока.

Анализ полученных данных позволил установить, что дрейфовое смещение дырок по направлению к катоду играет определяющую роль в увеличении концентрации неравновесных электронов в этой же части структуры. Поскольку в данном случае освещаемая область расположена вблизи анода, изменение в широких пределах дрейфового смещения дырок (и соответствующее изменение времени жизни в активной области структуры) может приводить к макси-

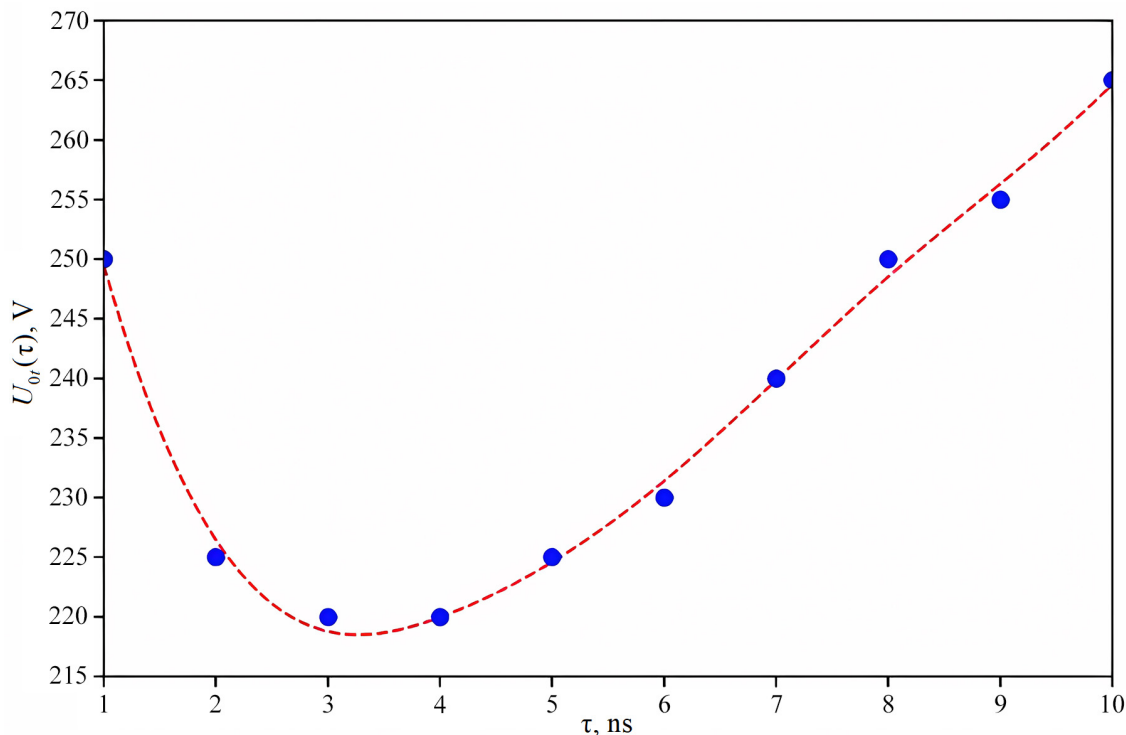


Рис. 4. Зависимость напряжения перехода U_{0t} от времени жизни τ
 Fig. 4. Dependence of the transition (threshold) voltage U_{0t} on the lifetime τ

мальным изменениям в характере распределения пространственного заряда и электрического поля в активной области структуры (от узкой прианодной области при малых временах жизни до практически полной длины активной области при больших временах), а также к значительным изменениям характерных размеров областей структуры, в которых происходит взаимодействие динамической неоднородности с неравновесными носителями посредством рекомбинационных процессов (по сравнению с другими вариантами локализации освещаемой области).

3.2. Рекомбинационная неустойчивость тока

Авторами в работах [39, 40] для исследуемых структур были установлены граничные значения концентрации примесных центров с глубокими уровнями, соответствующие возникновению в структуре устойчивых высокочастотных (обусловленных преимущественно ганновским механизмом) и низкочастотных (определяемых преимущественно рекомбинационным механизмом) колебаний тока.

В настоящей работе для исследования особенностей проявления рекомбинационной неустойчивости тока в исследуемых структурах параметры примесных центров в уравнении (6)

ЛПМ выбирались в соответствии с данными [39, 40] таким образом, чтобы доминирующим являлся концентрационный (рекомбинационный) механизм неустойчивости тока, заключающийся в возрастании захвата свободных электронов глубокими примесными уровнями в сильных электрических полях. Расчеты были проведены для двух значений концентрации примесных центров с глубокими уровнями $N_T = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, коэффициент захвата на глубокие уровни в отсутствие поля $c_0 \approx 7 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$, обратное время тепловой генерации электронов с глубокого уровня $g = 3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ (характеристическое время тепловой генерации электронов $1/g \approx 0.3 \cdot 10^{-8} \text{ с}$).

Остальные модельные параметры, используемые при проведении данной серии численных экспериментов, выбирались следующим образом. Шаги по времени и координате принимались постоянными и равными $h_t = 1 \text{ пс}$ и $h_x = 0.14 \text{ мкм}$ соответственно. Расчеты проводились для двух значений максимального значения функции оптической генерации $G_{\text{max}} = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ в (8). Значения τ_{max} и τ_{min} в (9), как и в случае ганновской неустойчивости, выбирались на основе известных данных для полужолирующего GaAs [80–83] и с учетом ре-

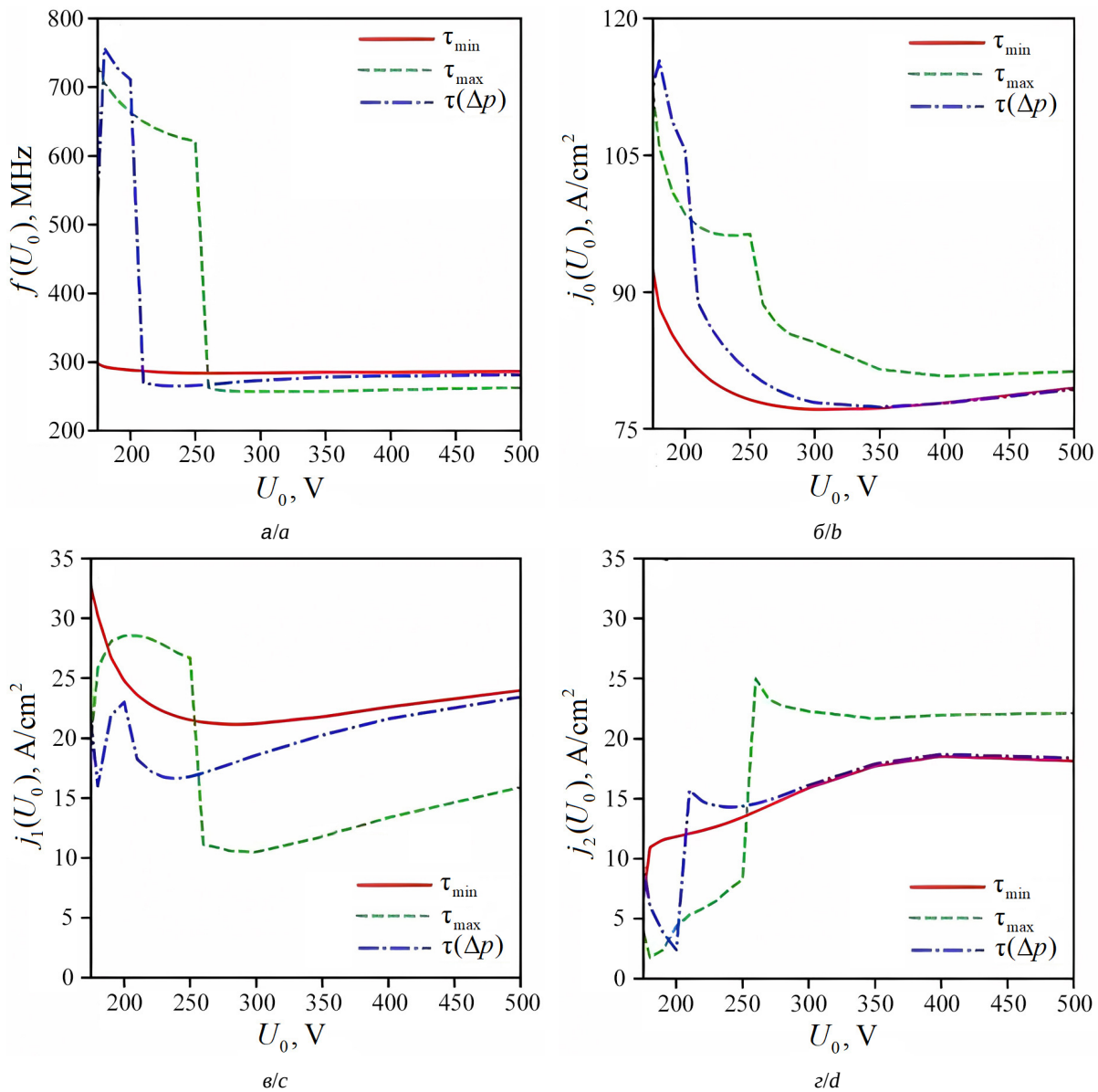


Рис. 5. Зависимости частоты f (а), постоянной составляющей j_0 (б), амплитуд основной j_1 (в) и второй j_2 (г) гармоник плотности тока от величины приложенного постоянного напряжения U_0 (локализованное освещение центральной части активной области структуры) (цвет онлайн)

Fig. 5. Dependences of the frequency f (a), the constant component j_0 (b), and the amplitudes of the main j_1 (c) and the second j_2 (d) harmonics of the current density on the magnitude of the applied DC voltage U_0 (localized illumination on the central part of the active region of the structure) (color online)

зультатов предшествующих работ авторов [39, 40, 84]: $\tau_{\max} = 100$ нс, $\tau_{\min} = 10$ нс. На основе численных экспериментов было определено значение параметра $\Delta p_{app} = 1.2 \cdot 10^{11}$ см⁻³, которое использовалось в последующих численных экспериментах.

Исследование влияния значения времени жизни на спектр генерируемых колебаний тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия в условиях проявления реком-

бинационной неустойчивости и локализованного оптического воздействия на центральную часть активной области структуры, проведенное авторами в более ранних работах [40, 84] с использованием локально-полевой математической модели, показало наличие двух характерных динамических состояний в различных интервалах значений времени жизни. При малых значениях времени жизни τ (порядка 1 нс), как и при отсутствии освещения структуры, наблюдался

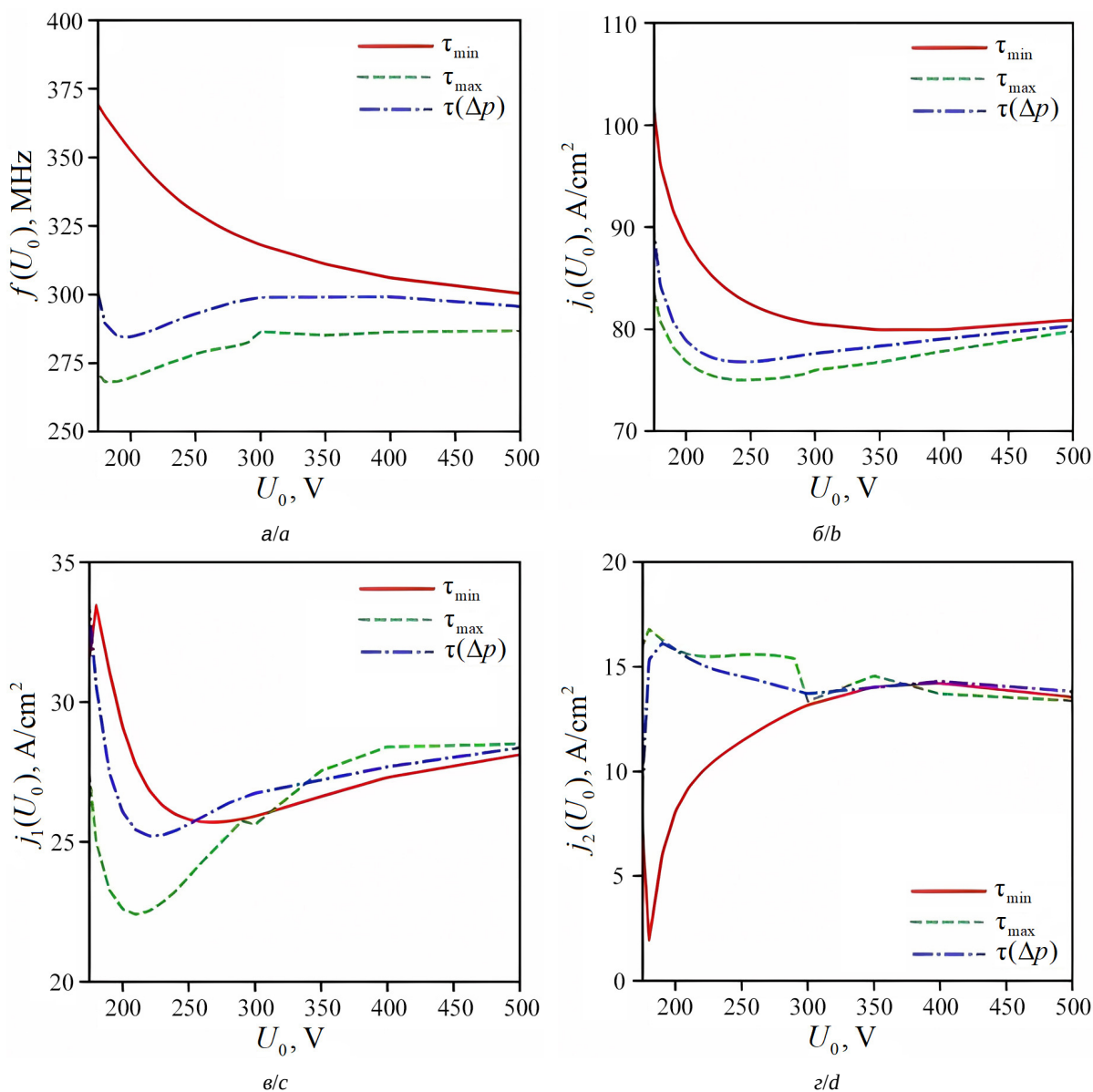


Рис. 6. Зависимости частоты f (а), постоянной составляющей j_0 (б), амплитуд основной j_1 (в) и второй j_2 (г) гармоник плотности тока от величины приложенного постоянного напряжения U_0 (локализованное освещение прианодной части активной области структуры) (цвет онлайн)

Fig. 6. Dependences of the frequency f (a), the constant component j_0 (b), and the amplitudes of the main j_1 (c) and the second j_2 (d) harmonics of the current density on the magnitude of the applied DC voltage U_0 (localized illumination on the near-anode part of the active region of the structure) (color online)

один режим с появлением устойчивых относительно низкочастотных (10–15 МГц) колебаний тока, обусловленных периодическим формированием вблизи катода, прохождением через всю активную область, включая освещаемую часть, и уходом в анод медленного рекомбинационного домена. В интервале больших значений $\tau = 30\text{--}100$ нс наблюдался другой режим с более высокочастотными (30–35 МГц) устойчивыми колебаниями тока меньшей амплитуды. Эти

колебания обусловлены периодическим формированием флуктуации пространственного заряда (и электрического поля) в правой (относительно освещаемой области) части структуры, что является результатом перераспределения поля между левой и правой частями структуры, распространяющейся в сторону статического домена, формируемого вблизи анода, и уходящей в анод. А в промежуточном интервале значений времени жизни $\tau = 10\text{--}30$ нс наблюдался более сложный



характер динамики электронных процессов и изменений в спектральном составе генерируемых колебаний. Однако в работах [40, 84] не было проведено детальное исследование особенностей проявления рекомбинационной неустойчивости тока в данном интервале значений τ .

Исследование динамики пространственного заряда, электрического поля и тока в исследуемых структурах в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости тока и локализованного оптического воздействия на центральную часть активной области структуры, проведенное в данной работе на основе ЛПМ (1)–(8) при фиксированном значении времени жизни, позволило установить, что при всех постоянных значениях времени жизни из интервала $\tau = 10\text{--}17$ нс в структуре возможно установление также двух основных режимов генерации колебаний тока.

При малых напряжениях наблюдается режим, периодический колебательный процесс в котором обусловлен формированием вблизи катода бегущего рекомбинационного домена, достигающего освещаемой области и рассасывающегося в ней (рис. 7, а, б). При больших напряжениях наблюдается режим, в котором формируемый рекомбинационный дипольный домен оказывается способным преодолевать освещаемую область и уходить в анод (рис. 7, в, г). При этом прохождение рекомбинационным доменом освещаемой области сопровождается появлением выраженного второго максимума на зависимости плотности тока от времени.

Установлено, что изменение постоянного значения времени жизни оказывает наиболее существенное влияние на характер динамики электронных процессов в интервале напряжений, соответствующем переходу структуры из одного основного динамического режима в другой. Обнаружено, что в интервале значений времени жизни $\tau = 13\text{--}17$ нс в указанном «промежуточном» интервале напряжений реализуется «переходный» режим, при котором в одном периоде наблюдается несколько (два или более) характерных циклов колебаний тока, соответствующих процессам последовательного формирования, движения и исчезновения (в освещаемой области или на аноде) подвижных рекомбинационных доменов (рис. 7, д, е). При этом форма (а соответственно, и спектр) генерируемых колебаний тока приобретает более сложный вид с несколькими выраженными максимумами на одном периоде. Анализ показал, что установление «переходного» режима связано с тем,

что распределение электронов и дырок, искажаемое при прохождении рекомбинационного домена через освещаемую область, не успевает возвращаться в исходное состояние до формирования очередного домена в начале периода.

Анализ численных результатов привел к выводу, что учет зависимости времени жизни от концентрации неравновесных дырок $\tau(\Delta p)$ (9) оказывает наиболее сильное влияние на спектр генерируемых колебаний тока при условии локализации освещаемой области в центральной части структуры.

При этом самые существенные изменения в спектре (рис. 8) наблюдаются в диапазоне напряжений 75–115 В. В этом случае частота основной гармоники колебаний тока оказывается практически в 3.5 раза ниже частоты основной гармоники, соответствующей случаю τ_{\max} , и в 1.5 раза ниже частоты основной гармоники, соответствующей случаю τ_{\min} .

Анализ также показал, что при напряжениях 55–70 В и при учёте зависимости времени жизни от концентрации неравновесных дырок $\tau(\Delta p)$ (9) характер динамики пространственного заряда и напряженности электрического поля в активной области структуры аналогичен наблюдаемому при постоянном времени жизни τ_{\min} и обусловлен процессами периодического возникновения, прохождения через активную область и ухода в анод неоднородности электрического поля, представляющей собой домен рекомбинационного типа. Рекомбинационный домен, формируясь в непосредственной близости от катода, развивается в левой (относительно освещаемой области) части активной области структуры, достигает освещаемой области, проходит через нее и далее уходит в анод.

При увеличении прилагаемого напряжения и достижении им значения 75 В при учёте зависимости $\tau(\Delta p)$ (9) происходит изменение характера динамики электронных процессов в активной области структуры: процессу ухода в анод «основного» рекомбинационного домена, сформировавшегося вблизи катода, прошедшего освещаемую область и достигшего прианодной области, предшествует возникновение в левой части активной области структуры (между катодом и освещаемой областью) «нового» домена. Он практически сразу рассасывается левее освещаемой области, не успев полностью сформироваться. Вслед за этим происходит рассасывание «основного» домена на аноде, после чего процесс

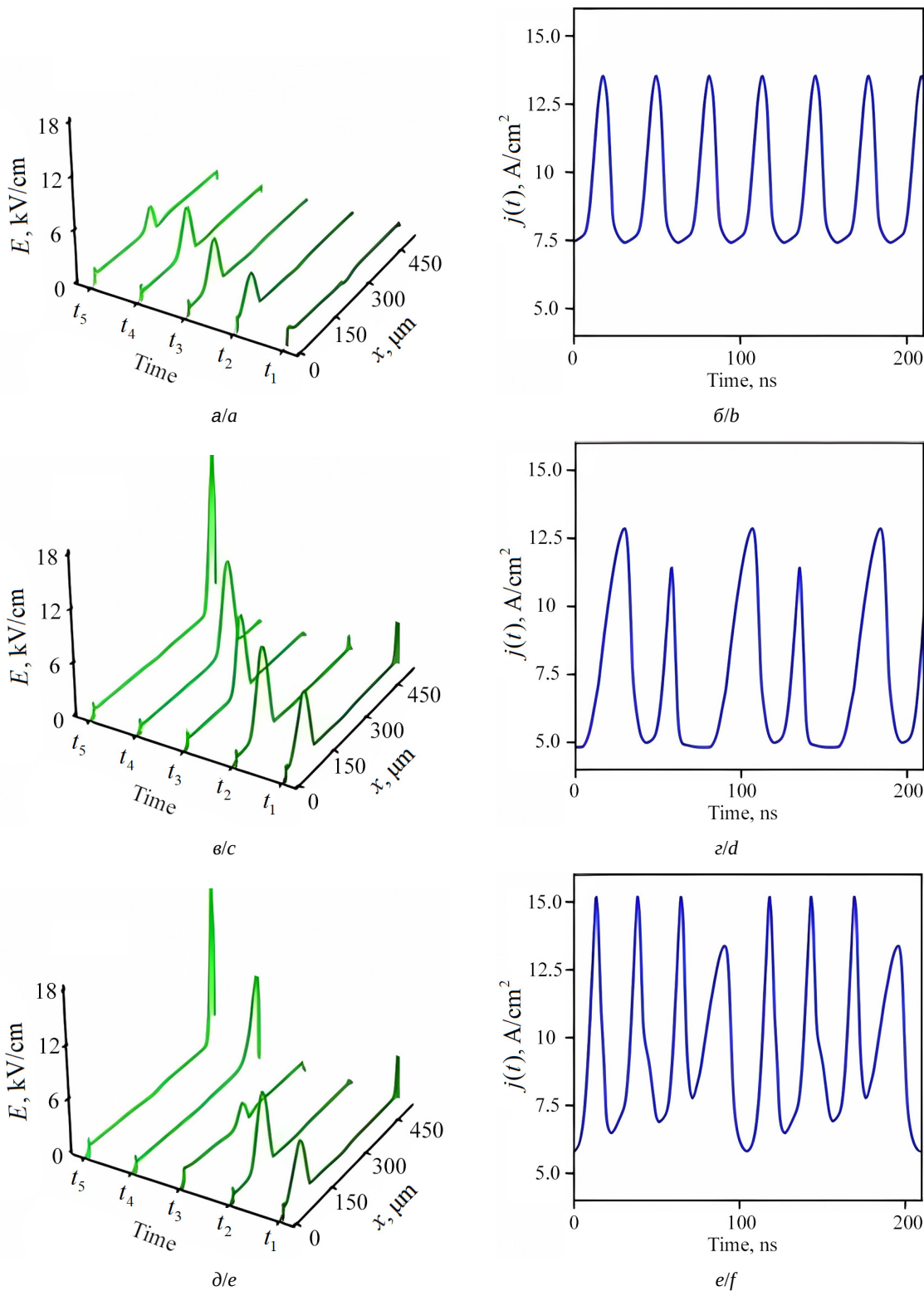


Рис. 7. Пространственные распределения электрического поля в структуре в различные моменты времени и характерная форма генерируемых колебаний тока в условиях локализации освещаемой области в центральной части активной области при $\tau = 10$ нс, $U_0 = 45$ В (а, б); при $\tau = 10$ нс, $U_0 = 70$ В (в, г); при $\tau = 15$ нс, $U_0 = 60$ В (д, е). $N_T = 9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $G_{\text{max}} = 4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$

Fig. 7. Spatial distributions of the electric field in the structure at different times and the characteristic shape of the generated current fluctuations under conditions of localized illumination on the central part of the active region of the structure at $\tau = 10$ ns, $U_0 = 45$ V (a, b); at $\tau = 10$ ns, $U_0 = 70$ V (c, d); at $\tau = 15$ ns, $U_0 = 60$ V (e, f); $N_T = 9 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; $G_{\text{max}} = 4 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$

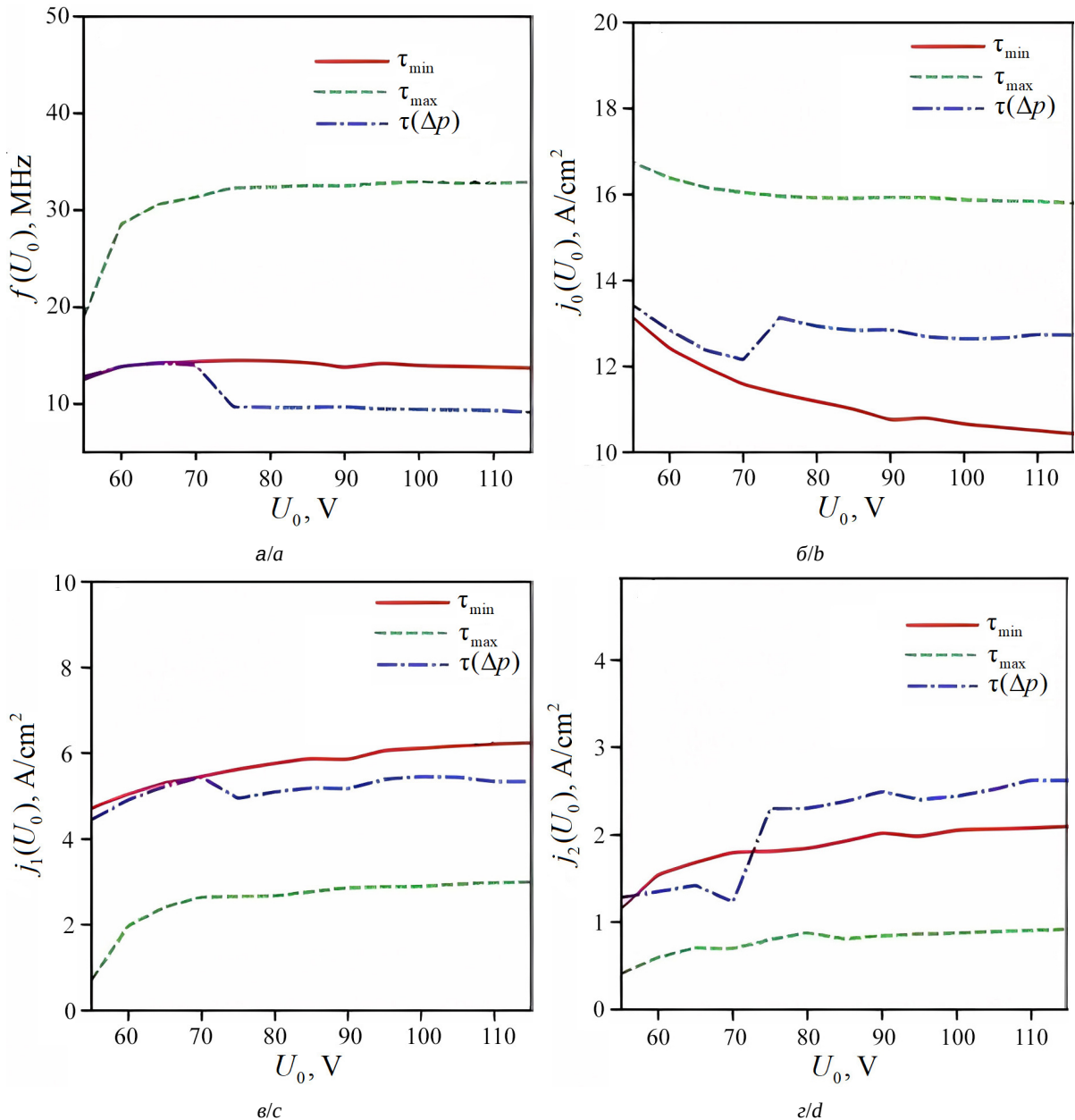


Рис. 8. Зависимости частоты f (а), постоянной составляющей j_0 (б), амплитуд основной j_1 (в) и второй j_2 (г) гармоник плотности тока от величины приложенного постоянного напряжения U_0 при локализованном освещении центральной части структуры; $N_T = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $G_{\text{max}} = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (цвет онлайн)

Fig. 8. Dependences of the frequency f (a), the constant component j_0 (b), and the amplitudes of the main j_1 (c) and the second j_2 (d) harmonics of the current density on the magnitude of the applied DC voltage U_0 under localized illumination on the central part of the structure; $N_T = 6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; $G_{\text{max}} = 3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ (color online)

периодически повторяется, что и обуславливает более сложную (характерную для диапазона напряжений 75–115 В) по сравнению с предыдущим случаем (55–70 В) форму генерируемых колебаний тока и соответствующие изменения в спектре.

При постоянном значении времени жизни равном τ_{max} характер динамики электронных процессов отличается от описанного выше слу-

чая. В структуре в непосредственной близости от анода формируется область сильного электрического поля (статический домен). В то же время левее этой области, но правее границы освещаемой области, формируется динамическая неоднородность в виде флуктуации электрического поля, которая движется по направлению к аноду. По мере приближения флуктуации к статическому домену напряженность электрического поля



в нем возрастает, достигая максимума. Далее происходит уход флуктуации в анод, сопровождаемый уменьшением напряженности электрического поля в статическом домене и формированием новой флуктуации.

Заключение

1. Результаты наших и теоретических, и экспериментальных исследований [39, 40, 85–89], включая данную работу, свидетельствуют о большой сложности процессов, происходящих в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия. Эта сложность, прежде всего, обусловлена неустойчивостью пространственного заряда и электрического поля, возникающей в исследуемой физической системе, её неоднородностью и существенной нелинейностью, зависимостью возникающих в ней колебательных процессов от множества различных внутренних и внешних факторов. В результате в структуре в активном состоянии наблюдаются изменения во времени и по координате всех динамических переменных (концентрации носителей заряда, напряженности электрического поля и пр.) в очень широких пределах (до порядков величины), что исключает возможность наблюдения и использования в анализе линейных режимов и моделей. Всесторонний и детальный анализ возможен только на основе численного решения модельной системы уравнений. Возникающие и наблюдаемые (в том числе и экспериментально), колебательные процессы происходят с частотами в широком диапазоне от десятков кГц до десятков ГГц. В связи с этим локально-полевая математическая модель является вполне адекватной для описания электронных процессов в исследуемых структурах на основе полуизолирующего GaAs. Исследования свойств этих структур в условиях локализованного освещения, а также учет наличия и перезарядки глубоких уровней, требует включения в базовую систему соответствующих уравнений, выражений, дополнений и описаний. В данной работе представлен, обоснован и тщательно апробирован соответствующий вариант ЛПМ (1)–(9), анализ которого позволил установить ряд интересных и важных эффектов.

2. На основе анализа результатов математического моделирования определена степень влияния освещения с длиной волны оптического излучения, соответствующей собственному поглощению арсенида галлия, при локализации

освещаемого участка в трех разных частях активной области исследуемой структуры (область между двумя высоколегированными приконтактными областями n^+). Установлено, что наибольшая степень влияния освещения на динамику происходящих в структуре процессов наблюдается при локализации освещаемого участка в центре активной области структуры, а также в прианодной области, а наименьшая – при его локализации вблизи катода. Поскольку локализация освещения в условиях эксперимента с учетом достаточно больших размеров активной области структуры (порядка 500 мкм) и реальной возможности обеспечения необходимых размеров самой освещаемой области (порядка 100 мкм) и ее конкретного позиционирования легко реализуется вполне простыми техническими средствами, то изменение локализации освещаемой области может рассматриваться как способ оперативного управления характеристиками (частота, амплитуда) возникающих колебательных процессов.

3. Установлено, что для возникающих и ганновской, и рекомбинационной неустойчивостей тока в исследуемой структуре на основе полуизолирующего GaAs колебательные процессы носят сложный негармонический характер с развитым и зависящим от многих факторов спектром. Колебательный процесс может характеризоваться общим периодом, содержащим два и более циклов, конкретные свойства и число которых зависят от реализуемого динамического состояния, определяемого величиной времени жизни и приложенного напряжения.

4. Численные эксперименты, проведенные с использованием разработанного варианта математической модели (1)–(9) в условиях ганновской неустойчивости тока и локализованного освещения в центре, позволили обнаружить существование в активном состоянии в исследуемой структуре двух устойчивых колебательных режимов. Переход от одного режима к другому происходит при некотором значении напряжения (напряжении перехода U_{0r}), которое зависит от выбираемых значений модельных параметров и характеристик, что сопровождается существенными изменениями на зависимостях основной частоты генерации $f(U_0)$, постоянной и амплитуд переменных составляющих (первой и второй гармоник) спектра плотности тока $j_0(U_0)$, $j_1(U_0)$, $j_2(U_0)$ от напряжения U_0 .

5. Численные эксперименты, проведенные с использованием разработанного варианта математической модели (1)–(9), свидетельствуют



о том, что впервые введенный в модель учет зависимости времени жизни носителей от их избыточной концентрации $\tau(\Delta p)$ (9) и установленное его влияние на спектральный состав генерируемых колебаний для случая рекомбинационной неустойчивости носят наиболее принципиальное значение при всех рассмотренных вариантах локализации освещаемого участка. Это связано с тем, что период возникающих колебательных процессов в этом случае оказывается близким к времени жизни и характеристическому времени перезарядки глубоких примесных центров, существующих в полуизолирующем GaAs и определяющих динамику перестройки рекомбинационных доменов. При этом учет зависимости $\tau(\Delta p)$ (9) оказывается, как и в случае ганновской неустойчивости, наиболее сильным и выраженным при локализации освещаемого участка в центральной и прианодной частях активной области исследуемой структуры. Моделирование показало, что при освещении структуры в центре активной области наиболее выраженные изменения в спектре наблюдаются в ограниченном интервале напряжений.

6. Приведенные в данной работе результаты математического моделирования и выявленные особенности в динамике электронных процессов, происходящих в высокоомной активной n -области структуры $n^+ - n^- - n - n^+ - \text{GaAs}$ (в полуизолирующем GaAs) в условиях локализованного оптического воздействия, свидетельствуют не только о значительном влиянии величины времени жизни на указанные особенности, но и о принципиальной необходимости учета его зависимости от концентрации неравновесных носителей заряда для более корректного и точного анализа протекающих процессов, а также о широких функциональных возможностях и о больших перспективах практического применения исследованных неустойчивостей тока в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия. Результаты соответствующих и/или близких по постановке задач экспериментальных исследований [31, 33, 42, 45, 46, 61, 62], включая работы авторов данной статьи [40, 41, 85–89], также однозначно подтверждают большое многообразие, сложность и управляемость происходящих физических процессов в исследованных или подобных им структурах, а также и большие практические перспективы этого направления функциональной микроэлектроники. Исследования в данном направлении, несомненно, должны иметь продолжение и развитие.

Список литературы

1. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Миронов А. Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М. : Наука, 1972. 416 с.
2. Коцаренко Н. Я., Федорченко А. М. Критерий абсолютной и конвективной неустойчивости для параметрически связанных волн // ЖТФ. 1969. Т. 39, вып. 5. С. 951–953.
3. Ахиезер А. И., Половин Р. В. Критерии нарастания волн // УФН. 1971. Т. 104, № 2. С. 185–200. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0104.197106a.0185>
4. Скотт Э. Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике. М. : Советское радио, 1977. 368 с.
5. Пожела Ю. К. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. М. : Наука, 1977. 368 с.
6. Владимиров В. В., Волков А. Ф., Мейлихов Е. З. Плазма полупроводников. М. : Атомиздат, 1979. 256 с.
7. Федорченко А. М., Коцаренко Н. Я. Абсолютная и конвективная неустойчивость в плазме и твердых телах. М. : Наука, 1981. 176 с.
8. Щука А. А. Электроника : учебное пособие / под ред. проф. А. С. Сигова. СПб. : БХВ-Петербург, 2006. 800 с.
9. Щука А. А., Сигов А. С. Электроника : в 4 ч. Ч. 4. Функциональная электроника : учебник. М. : Юрайт, 2025. 184 с.
10. Смирнов Ю. А., Соколов С. В., Титов Е. В. Основы нано- и функциональной электроники : учебное пособие. СПб. : Лань, 2022. 320 с.
11. Балодис Ю. Н., Лутовинов С. И. Устройства функциональной электроники : в 2 ч. Ч. 1. Акустоэлектронные устройства. Л. : Издательство ЛИЭС, 1988. 63 с.
12. Гуляев Ю. В., Бальшева О. Л., Григорьевский В. И., Дмитриев В. Ф., Мансфельд Г. Д. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / под ред. Ю. В. Гуляева. М. : Радиотехника, 2012. 571 с.
13. Chumak A. V., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon spintronics // Nature Physics. 2015. Vol. 11, № 6. P. 453–461. <https://doi.org/10.1038/nphys3347>
14. Krawczyk M., Grundler D. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure // J. Phys.: Condens. Matter. 2014. Vol. 26, № 12. Art. 123202. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/12/123202>
15. Никитов С. А., Сафин А. Р., Калябин Д. В., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Логунов М. В., Морозова М. А., Одинцов С. А., Осокин С. А., Шараевская А. Ю., Шараевский Ю. П., Кирилюк А. И. Диэлектрическая магноника – от гигагерцев к терагерцам // УФН. 2020. Т. 190, № 10. С. 1009–1040. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.07.038609>
16. Дин Р., Матарезе Р. Новый тип СВЧ-транзистора – усилитель бегущей волны на n -GaAs // ТИИЭР. 1972. Т. 60, № 12. С. 23–43.
17. Kumabe K., Kanbe H. GaAs travelling-wave amplifier // Int. J. Electronics. 1985. Vol. 58, № 4. P. 587–611. <https://doi.org/10.1080/00207218508939056>



18. Михайлов А. И., Сергеев С. А., Горячев А. А. Интегральный преобразователь частоты миллиметрового диапазона на волнах пространственного заряда в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43, № 2. С. 16–24.
19. Garcia-Barrientos A., Palankovski V. Numerical simulation of amplification of space charge waves in *n*-InP films // Materials Science and Engineering: B. 2011. Vol. 176, iss. 17. P. 1368–1372. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.02.014>
20. Garcia-Barrientos A., Palankovski V. Numerical simulation of space charge waves in *n*-InP films and microwave frequency conversion under negative differential conductivity // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98, iss. 7. Art. 072110. <https://doi.org/10.1063/1.3555467>
21. Garcia-Barrientos A., Nikolova N., Filipovic L., Gutierrez-D E. A., Serrano V., Macias-Velasquez S., Zarate-Galvez S. Numerical simulations of space charge waves amplification using negative differential conductance in strained Si/SiGe at 4.2 K // Crystals. 2023. Vol. 13, № 9. Art. 1398. <https://doi.org/10.3390/cryst13091398>
22. Абрамов А. С., Золотовский И. О., Кадочкин А. С., Моисеев С. Г., Паняев И. С., Санников Д. Г., Явтушенко М. С., Светухин В. В., Фотиади А. А. Генерация частотно-модулированных оптических импульсов ИК диапазона в полупроводниковой волноводной структуре с реализуемой волной пространственного заряда // Квантовая электроника. 2022. Т. 52, № 11. С. 1044–1049. <https://doi.org/10.3103/S1068335623150022>
23. Елисов М. В. Самоорганизационная динамика концентрации носителей зарядов в полупроводниках при их инжекции // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, № 5. С. 622–627. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003064>
24. Зикриллаев Н. Ф., Шоабдурахимова М. М., Курбанова У. Х., Наркулов Н., Шакаров Ф. К. Влияние магнитного поля, электрического поля и интенсивности освещения на параметры рекомбинационных волн в кремнии // Электронная обработка материалов. 2024. Т. 60, № 1. С. 106–113. <https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.106>
25. Чередов А. И., Щелканов А. В. Преобразователь напряжение – частота на основе электрического домена // Омский научный вестник. 2017. № 1 (151). С. 90–92.
26. García-Sánchez S., Daher M. Abou., Lesecq M., Huo L., Lingaparthi R., Nethaji D., Radhakrishnan K., Íñiguez-de-la-Torre I., Vasallo B. G., Pérez S., González T., Mateos J. On the practical limitations for the generation of Gunn oscillations in highly doped GaN diodes // IEEE Trans. Electron Devices. 2023. Vol. ED-70, iss. 7. P. 3447–3453. <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3271610>
27. García-Sánchez S., Íñiguez-de-la-Torre I., Pérez S., González T., Mateos J. Monte Carlo study of Gunn oscillations in geometrically shaped planar Gunn diodes based on doped GaN: Influence of geometry, intervalley energy, and temperature // IEEE Trans. Electron Devices. 2024. Vol. ED-71, iss. 10. P. 5901–5907. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3438114>
28. Lee W. Z., Ong D. S., Choo K. Y., Yilmazoglu O., Hartnagel H. L. Monte Carlo evaluation of GaN THz Gunn diodes // Semiconductor Science and Technology. 2021. Vol. 36, № 12. Art. 125009. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac2b4d>
29. Semyonov E. V., Malakhovskij O. Y. Short-pulse properties of the Gunn diode // IEEE Trans. Electron Devices. 2020. Vol. ED-67, iss. 5. P. 2100–2105. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2982295>
30. Кэррол Дж. СВЧ-генераторы на горячих электронах. М. : Мир, 1972. 382 с.
31. Левинштейн М. Е., Пожела Ю. К., Шур М. С. Эффект Ганна. М. : Советское радио, 1975. 288 с.
32. Левинштейн М. Е. Новые результаты в исследовании междолинного перехода горячих электронов (Обзор) // ФТП. 1979. Т. 13, вып. 7. С. 1249–1268.
33. Шур М. С. Современные приборы на основе арсенида галлия. М. : Мир, 1991. 632 с.
34. Барыбин А. А. Волны в тонкопленочных полупроводниковых структурах с горячими электронами. М. : Наука, 1986. 288 с.
35. Иванченко В. А., Климов Б. Н., Михайлов А. И. Параметрическое взаимодействие высокочастотных волн в *n*-GaAs // ФТП. 1979. Т. 13, вып. 6. С. 1172–1174. EDN: XWJIGH
36. Игнатъев Ю. М., Михайлов А. И. Параметрическое усиление волн пространственного заряда в полупроводнике с отрицательной дифференциальной проводимостью // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33, № 10. С. 76–78. EDN: YNBQHC
37. Барыбин А. А., Михайлов А. И. Параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах // ЖТФ. 2000. Т. 70, вып. 2. С. 48–52. EDN: RYOQNP
38. Барыбин А. А., Михайлов А. И. Анализ параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах асимметричного типа на основе арсенида галлия // ЖТФ. 2003. Т. 73, вып. 6. С. 103–109. EDN: RYOQNP
39. Михайлов А. И., Митин А. В., Терентьева А. И. Особенности проявления ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниках в условиях оптического воздействия // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии : сборник статей / под общей редакцией проф. А. И. Михайлова. Саратов : ИЦ «Наука», 2013. С. 130–153. EDN: ZMIAMH
40. Михайлов А. И., Митин А. В., Кожевников И. О. Неустойчивости тока в полуизолирующем арсениде галлия: математическое моделирование, эксперимент, функциональные возможности // Физика полупроводников и твердотельная электроника : сборник статей / под общей редакцией проф. А. И. Михайлова. Саратов : Амирит, 2022. С. 42–76. EDN: НТХМQH



41. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Волны пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии : сборник статей / под общ. ред. проф. А. И. Михайлова. Саратов : ИЦ «Наука», 2013. С. 59–104. EDN: ZMHZXR
42. Neumann A. Slow domains in semi-insulating GaAs // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90, iss. 1. P. 1–26. <https://doi.org/10.1063/1.1377023>
43. Царапкин Д. П. Генераторы СВЧ на диодах Ганна. М. : Радио и связь, 1982. 112 с.
44. Давыдова Н. С., Данюшевский Ю. З. Диодные генераторы и усилители СВЧ. М. : Радио и связь, 1986. 184 с.
45. Segev M., Collings B., Abraham D. Photorefractive Gunn effect // Physical Review Letters. 1996. Vol. 76, № 20. P. 3798–3801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.3798>
46. Bonilla L. L., Kindelan M., Hernando P. J. Photorefractive Gunn effect // Physical Review B. 1998. Vol. 58, № 11. Art. 7046. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.7046>
47. Qi Y., Yu Z. G., Flatté M. E. Spin Gunn effect // Physical Review Letters. 2006. Vol. 96. Art. 026602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.026602>
48. Hsu H. W. Time-dependent Nuclear Spin Polarization, Effects of Device Non-uniformity on the Gunn Effect, and Electron Spin Dynamics at High Electric Fields in GaAs: A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Applied Physics) in The University of Michigan. 2022. <https://doi.org/10.7302/6107>
49. Прохоров Э. Д., Белецкий Н. И. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переходом электронов. Харьков : Издательство Харьковского университета, 1982. 135 с.
50. Бородовский П. А., Осадчий В. М. Междолинный перенос электронов в полупроводниках A^3B^5 . Новосибирск : Издательство СО АН СССР, 1987. 171 с.
51. Пореш С. Б., Тагер А. С., Кальфа А. А. Математическое моделирование и анализ на ЭВМ высокочастотных характеристик диодов Ганна // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1976. Вып. 10. С. 19–31.
52. Коуплэнд Дж. А. Генератор с большим КПД, работающий в режиме ОНОЗ // ТИИЭР. 1969. Т. 57, № 10. С. 91–93.
53. Голант Е. И., Кальфа А. А., Пореш С. Б., Тагер А. С. Моделирование на ЭВМ диодов Ганна миллиметрового диапазона длин волн // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1981. Вып. 7. С. 23–28.
54. Кальфа А. А., Пореш С. Б., Тагер А. С. Эффект Ганна на высоких частотах // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. М. : ЦНИИ «Электроника», 1984. Вып. 4. 34 с.
55. Михайлов А. И., Митин А. В. Анализ нелинейной динамики тока в длинных высокоомных образцах n -GaAs в условиях локальной засветки. Ч. 1. Формулировка модели // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10, № 2. С. 49–56. EDN: LBDLCB
56. McCumber D. E., Chynoweth A. G. Theory of negative-conductance amplification and of Gunn instabilities in “two-valley” semiconductors // IEEE Trans. Electron Devices. 1966. Vol. ED-13, iss. 1. P. 4–21. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1966.15629>
57. Чайка В. Е. О сравнении двухтемпературной и однотемпературной моделей диода Ганна // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1979. Вып. 1. С. 99–100.
58. Михайлов А. И. Усовершенствованный вариант однотемпературной модели эффекта Ганна в арсениде галлия // Известия вузов. Радиотехника. 1999. Т. 42, № 10. С. 46–50. EDN: YNBQWI
59. Blotekaer K. Transport equations for electrons in two-valley semiconductors // IEEE Trans. Electron Devices. 1970. Vol. ED-17, iss. 1. P. 38–47. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1970.16921>
60. Михайлов А. И., Разумихин К. А. Исследование динамики электронов в полупроводниковых структурах диодов Ганна на основе двухтемпературной модели // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Т. 9, № 2. С. 74–78. EDN: MTHNVX
61. Hsu H. W., Sih V. Illumination-induced modulation of conductivity and Gunn oscillation properties in epitaxial GaAs // J. Appl. Phys. 2021. Vol. 129, iss. 9. Art. 095701. <https://doi.org/10.1063/5.0041508>
62. Hsu H. W., Dominguez M. J., Sih V. Gunn threshold voltage characterization in GaAs devices with wedge-shaped tapering // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 128, iss. 7. Art. 074502. <https://doi.org/10.1063/5.0016101>
63. Бобрешов А. М., Нестеренко Ю. Н., Разуваев Ю. Ю. Распределение поля и зарядов в переходе между n -GaAs и полуизолирующей подложкой, легированной хромом // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16, № 3. С. 50–55. EDN: RRSMEI
64. Martin G. M., Farges J. P., Jacob G., Hallais J. P., Poiblaud G. Compensation mechanisms in GaAs // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, iss. 5. P. 2840–2852. <https://doi.org/10.1063/1.327952>
65. Полуизолирующие соединения АIII BV / под ред. Дж. У. Руса. М. : Металлургия, 1984. 257 с.
66. Михайлов А. И., Митин А. В. Анализ нелинейной динамики тока в длинных высокоомных образцах n -GaAs в условиях локальной засветки. Ч. 2. Результаты моделирования // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13, № 1. С. 73–81. EDN: KXHWMF
67. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления. М. : Мир, 1980. 208 с.
68. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М. : Физматгиз, 1963. 494 с.
69. Роуз А. Основы теории фотопроводимости. М. : Мир, 1966. 192 с.
70. Роках А. Г. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и диэлектриках : учебное пособие.



- Саратов : Издательство Саратовского университета, 1984. 158 с.
71. *Фистуль В. И.* Введение в физику полупроводников : учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 1984. 352 с.
 72. *Зу С.* Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Мир, 1984. Кн. 1. 456 с.
 73. *Thim H. W.* Computer study of bulk GaAs devices with random one-dimensional doping fluctuations // *J. Appl. Phys.* 1968. Vol. 39, iss. 8. P. 3897–3904. <https://doi.org/10.1063/1.1656872>
 74. *Dalal V. L., Dreeben A. B., Triano A.* Temperature dependence of hole velocity in *p*-GaAs // *J. Appl. Phys.* 1971. Vol. 42, iss. 7. P. 2864–2867. <https://doi.org/10.1063/1.1660641>
 75. *Blakemore J. S.* Semiconducting and other major properties of gallium arsenide // *J. Appl. Phys.* 1982. Vol. 53, iss. 10. P. R123–R181. <https://doi.org/10.1063/1.331665>
 76. *Levinshtein M. E., Rumyantsev S. L., Shur M. S.* Handbook Series on Semiconductor Parameters : in 5 vols. Singapore : World Scientific, 1996. Vol. 1. 237 p.
 77. *Dargys A., Kundrotas J.* Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP. Vilnius : Science and Encyclopedia Publishers, 1994. 264 p.
 78. *Пореш С. Б., Тагер А. С.* Теоретическое исследование генераторов на дриодах с междолинным электронным переносом // *Радиотехника и электроника.* 1978. Т. 23, № 4. С. 834–840.
 79. *Милнс А.* Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М. : Мир, 1977. 562 с.
 80. *Das B., Aguilera I., Rau U., Kirchartz T.* What is a deep defect? Combining Shockley-Read-Hall statistics with multiphonon recombination theory // *Phys. Rev. Materials.* 2020. Vol. 4, № 2. Art. 024602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.024602>
 81. *Kolesnikova I. A., Kobtsev D. A., Redkin R. A., Voevodin V. I., Tyazhev A. V., Tolbanov O. P., Sarkisov Y. S., Sarkisov S. Y., Atuchin V. V.* Optical pump–terahertz probe study of HR GaAs:Cr and SI GaAs:El2 structures with long charge carrier lifetimes // *Photonics.* 2021. Vol. 8, № 12. Art. 575 <https://doi.org/10.3390/photonics8120575>
 82. *Хлудков С. С., Толбанов О. П., Вилсова М. Д., Прудаев И. А.* Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. 256 с.
 83. *Ringel S. A., Rohatgi A.* The effects of trap-induced lifetime variations on the design and performance of high-efficiency GaAs solar cells // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2002. Vol. ED-38, iss. 11. P. 2402–2409. <https://doi.org/10.1109/16.97400>
 84. *Михайлов А. И., Митин А. В.* Влияние времени жизни носителей заряда на особенности динамики поля и тока в структурах на основе арсенида галлия в условиях локализованной засветки // III НАУЧНЫЙ ФОРУМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ТТТ-2019. Физика и технические приложения волновых процессов ФитПВП-2019 : материалы XVII Международной научно-технической конференции (Казань, Россия, 18–22 ноября 2019 г.). Казань : Издательство Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева, 2019. С. 22, 23. EDN: EUPDDC
 85. *Михайлов А. И., Митин А. В.* Экспериментальное исследование спектра колебаний тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах арсенида галлия в условиях засветки // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы.* 2011. Т. 14, № 4. С. 87–91. EDN: ONZHCH
 86. *Михайлов А. И., Митин А. В., Кожевников И. О.* Функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота на основе высокоомного *n*-GaAs // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы.* 2014. Т. 17, № 4. С. 64–69. EDN: TJHXWT
 87. *Михайлов А. И., Митин А. В., Кожевников И. О.* Особенности возникновения устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия // *Известия вузов. Радиоэлектроника.* 2015. Т. 58, № 4. С. 59–64. EDN: UCHEYH
 88. *Михайлов А. И., Кожевников И. О., Митин А. В.* Исследование возможности реализации среднечастотного широкополосного генератора качающейся частоты на структуре полуизолирующего арсенида галлия // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика.* 2024. Т. 24, вып. 4. С. 412–417. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-4-412-417>
 89. *Кожевников И. О., Михайлов А. И., Браташов Д. Н.* Исследование влияния топологии контактных площадок на воспроизводимость параметров колебаний тока в мезапланарных структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика.* 2015. Т. 15, вып. 1. С. 51–56. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2015-15-1-51-56>

References

1. *Bonch-Bruевич V. L., Zvyagin I. P., Mironov A. G.* *Domennaya elektricheskaya neustojchivost' v poluprovodnikakh* [Domain electrical instability in semiconductors]. Moscow, Nauka, 1972. 416 p. (in Russian).
2. *Kocarenko N. Ya., Fedorchenko A. M.* Criteria of absolute and convective instability for parametrically coupled waves. *Technical Physics*, 1969, vol. 39, iss. 5, pp. 951–953 (in Russian).
3. *Akhiezer A. I., Polovin R. V.* Criteria for wave growth. *Sov. Phys. Usp.*, 1971, vol. 14, pp. 278–285. <https://doi.org/10.1070/PU1971v014n03ABEH004700>
4. *Scott A.* *Active and nonlinear wave propagation in electronics.* New York, Wiley-Interscience. 1970. 326 p.
5. *Pozhela Yu. K.* *Plazma i tokovye neustojchivosti v poluprovodnikakh* [Plasma and current instabilities in semiconductors]. Moscow, Nauka, 1977. 368 p. (in Russian).



6. Vladimirov V. V., Volkov A. F., Mejlkhov E. Z. *Plazma poluprovodnikov* [Plasma of semiconductors]. Moscow, Atomizdat, 1979. 256 p. (in Russian).
7. Fedorchenko A. M., Kocarenko N. Ya. *Absolyutnaya i konvektivnaya neustojchivost' v plazme i tverdykh telakh* [Absolute and convective instability in plasma and solid state]. Moscow, Nauka, 1981. 176 p. (in Russian).
8. Shchuka A. A. *Elektronika. Uchebnoe posobie* [Sigov A. S., ed. Electronics: Tutorial]. St. Petersburg, BHV-Peterburg. 2006. 800 p. (in Russian),
9. Shchuka A. A., Sigov A. S. *Elektronika: v 4 ch. Chast' 4. Funktsional'naya elektronika: uchebnyk* [Electronics : in 4 pts. Pt. 4. Functional Electronics: Tutorial]. Moscow, Urait, 2025. 183 p. (in Russian).
10. Smirnov Yu. A., Sokolov S. V., Titov E. V. *Osnovy nano- i funktsional'noj elektroniki: uchebnoe posobie* [Fundamentals of nano- and functional electronics: Tutorial]. St. Petersburg, Lan', 2022. 320 p. (in Russian).
11. Balodis Yu. N., Lutovinov S. I. *Ustrojstva funktsional'noj elektroniki. Ch. 1. Akustoelektronnye ustrojstva* [Functional electronics devices. Pt. 1. Acoustoelectronic devices]. Leningrad, LIES Publ., 1988. 63 p. (in Russian).
12. Gulyaev Yu. V., Balysheva O. L., Grigor'evskij V. I., Dmitriev V. F., Mansfel'd G. D. *Akustoelektronnye ustrojstva obrabotki i generatsii signalov. Printsipy raboty, rascheta i proektirovaniya* [Gulyaev Yu. V., ed. Acoustoelectronic signal processing and generation devices. Principles of operation, calculation and design]. Moscow, Radiotekhnika, 2012. 571 p. (in Russian).
13. Chumak A. V., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nature Physics*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 453–461. <https://doi.org/10.1038/nphys3347>
14. Krawczyk M., Grundler D. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2014, vol. 26, no. 12, art. 123202. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/12/123202>
15. Nikitov S. A., Safin A. R., Kalyabin D. V., Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Logunov M. V., Morozova M. A., Odintsov S. A., Osokin S. A., Sharaevskaya A. Yu., Sharaevskij Yu. P., Kirilyuk A. I. Dielectric magnonics: From gigahertz to terahertz. *Phys.Usp.*, 2020, vol. 63, no. 10, pp. 945–974. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.07.038609>
16. Dean R. H., Matarese R. J. The GaAs traveling-wave amplifier as a new kind of microwave transistor. *Proc. IEEE*, 1972, vol. 60, iss. 12, pp. 1486–1502. <https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8948>
17. Kumabe K., Kanbe H. GaAs travelling-wave amplifier. *Int. J. Electronics*, 1985, vol. 58, no. 4, pp. 587–611. <https://doi.org/10.1080/00207218508939056>
18. Mikhailov A. I., Sergeev S. A., Goryachev A. A. Integrated millimeter-wave frequency converter on space-charge waves in semiconductors with negative differential conductivity. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2000, vol. 43, no. 2, pp. 16–24 (in Russian)
19. Garcia-Barrientos A., Palankovski V. Numerical simulation of amplification of space charge waves in n-InP films. *Materials Science and Engineering: B*, 2011, vol. 176, no. 17, pp. 1368–1372. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.02.014>
20. Garcia-Barrientos A., Palankovski V. Numerical simulation of space charge waves in n-InP films and microwave frequency conversion under negative differential conductivity. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, iss. 7, art. 072110. <https://doi.org/10.1063/1.3555467>
21. Garcia-Barrientos A., Nikolova N., Filipovic L., Gutierrez-D E. A., Serrano V., Macias-Velasquez S., Zarate-Galvez S. Numerical simulations of space charge waves amplification using negative differential conductance in strained Si/SiGe at 4.2 K. *Crystals*, 2023, vol. 13, no. 9, art. 1398. <https://doi.org/10.3390/cryst13091398>
22. Abramov A. S., Zolotovskii I. O., Kadochkin A. S., Moiseev S. G., Panyaev I. S., Sannikov D. G., Yavtushenko M. S., Svetukhin V. V., Fotiadi A. A. Generation of frequency-modulated optical pulses of the IR range in a semiconductor waveguide structure with an implemented space charge wave. *Bull. Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, suppl. 3, pp. S374–S382. <https://doi.org/10.3103/S1068335623150022>
23. Elisov M. V. Self-organization dynamics of charge carrier concentration in semiconductors due to the charge injection. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2023, vol. 31, no. 5, pp. 622–627 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003064>
24. Zikrillaev N. F., Shoabdurakhimova M. M., Kurbanova U. Kh., Narkulov N., Shakarov F. K. Influence of the magnetic field, electric field and illumination intensity on the parameters of recombination waves in silicon. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic processing materials], 2024, vol. 60, no. 1, pp. 106–113 (in Russian). <https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.106>
25. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Voltage – frequency converter based on the electrical domain. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2017, no. 1 (151), pp. 90–92 (in Russian).
26. García-Sánchez S., Daher M. Abou, Lesecq M., Huo L., Lingaparthi R., Nethaji D., Radhakrishnan K., Íñiguez-de-la-Torre I., Vasallo B. G., Pérez S., González T., Mateos J. On the practical limitations for the generation of Gunn oscillations in highly doped GaN diodes. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2023, vol. ED-70, iss. 7, pp. 3447–3453. <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3271610>
27. García-Sánchez S., Íñiguez-de-la-Torre I., Pérez S., González T., Mateos J. Monte Carlo study of Gunn oscillations in geometrically shaped planar Gunn diodes based on doped GaN: Influence of geometry, intervalley energy, and temperature. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2024, vol. ED-71, iss. 10, pp. 5901–5907. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3438114>
28. Lee W. Z., Ong D. S., Choo K. Y., Yilmazoglu O., Hartnagel H. L. Monte Carlo evaluation of GaN THz Gunn diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 2021, vol. 36, no. 12, art. 125009. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac2b4d>
29. Semyonov E. V., Malakhovskij O. Y. Short-pulse properties of the Gunn diode. *IEEE Trans. Electron Devices*,



- 2020, vol. ED-67, iss. 5, pp. 2100–2105. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2982295>
30. Carroll John E. *Hot Electron Microwave Generators*. New York, Elsevier, 1970. 306 p.
 31. Levinshtejn M. E., Pozhela Yu. K., Shur M. S. *Effekt Ganna* [Gunn effect]. Moscow, Sovetskoe radio, 1975. 288 p. (in Russian).
 32. Levinshtejn M. E. New results in the study of hot electron intervalley transition (Review). *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1979, vol. 13, iss. 7, pp. 1249–1268 (in Russian).
 33. Shur M. *GaAs Devices and Circuits*. New York, Springer, 1987. 670 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1989-2>
 34. Barybin A. A. *Volny v tonkoplenochnykh poluprovodnikovykh strukturakh s goryachimi elektronami* [Waves in thin-film semiconductor structures with hot electrons]. Moscow, Nauka, 1986. 288 p. (in Russian).
 35. Ivanchenko V. A., Klimov B. N., Mikhailov A. I. [Parametric interaction of high-frequency waves in *n*-GaAs. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 1979, vol. 13, iss. 6, pp. 1172–1174 (in Russian). EDN: XWJIGH
 36. Ignat'ev Yu. M., Mikhailov A. I. [Parametric amplification of space-charge waves in a semiconductor with negative differential conductivity]. *Radioelectronics and Communications Systems*, 1990, vol. 33, no. 10, pp. 76–78 (in Russian). EDN: YNBQHC
 37. Barybin A. A., Mikhailov A. I. Parametric interaction of space-charge waves in thin-film semiconductor structures. *Tech. Phys.*, 2000, vol. 45, pp. 189–193. <https://doi.org/10.1134/1.1259595>
 38. Barybin A. A., Mikhailov A. I. Parametric interaction of space-charge waves in asymmetric thin-film *n*-GaAs structures. *Tech. Phys.*, 2003, vol. 48, pp. 761–767. <https://doi.org/10.1134/1.1583832>
 39. Mikhailov A. I., Mitin A. V., Terent'eva A. I. The features of Gunn effect and recombination current instabilities in high-resistance semiconductors under optical influence. In: Mikhailov A. I., ed. *Poluprovodnikovaya elektronika i molekulyarnye nanotekhnologii: sbornik statej* [Semiconductor Electronics and Molecular Nanotechnologies: Collection of articles]. Saratov, Izdatel'skii tsentr "Nauka", 2013, pp. 130–153 (in Russian). EDN: ZMIAMH
 40. Mikhailov A. I., Mitin A. V., Kozhevnikov I. O. Current instability in semi-insulating gallium arsenide: Mathematical modeling, experiment, functionality. In: Mikhailov A. I., ed. *Fizika poluprovodnikov i tverdotel'naya elektronika: Sbornik statej* [Physics of Semiconductors and Solid-State Electronics: Collection of articles]. Saratov, Amirit, 2022, pp. 42–76 (in Russian). EDN: HTXMQH
 41. Mikhailov A. I., Sergeev S. A. Space-charge waves in thin-film semiconductor structures with negative differential conductivity. In: Mikhailov A. I., ed. *Poluprovodnikovaya elektronika i molekulyarnye nanotekhnologii: Sbornik statej* [Semiconductor Electronics and Molecular Nanotechnologies: Collection of articles]. Saratov, Izdatel'skij Tsentr "Nauka", 2013, pp. 59–104 (in Russian). EDN: ZMHZXR
 42. Neumann A. Slow domains in semi-insulating GaAs. *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 90, iss. 1, pp. 1–26. <https://doi.org/10.1063/1.1377023>
 43. Carapkin D. P. *Generatory SVCH na diodakh Ganna* [Microwave generators based on Gunn diodes]. Moscow, Radio i svyaz', 1982. 112 p. (in Russian).
 44. Davydova N. S., Danyushevskij Yu. Z. *Diodnye generatory i usiliteli SVCH* [Diode generators and microwave amplifiers]. Moscow, Radio i svyaz', 1986. 184 p. (in Russian).
 45. Segev M., Collings B., Abraham D. Photorefractive Gunn effect. *Physical Review Letters*, 1996, vol. 76, no. 20, pp. 3798–3801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.3798>
 46. Bonilla L. L., Kindelan M., Hernando P. J. Photorefractive Gunn effect. *Physical Review B*, 1998, vol. 58, no. 11, art. 7046. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.7046>
 47. Qi Y., Yu Z. G., Flatté M. E. Spin Gunn effect. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, no. 2, art. 026602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.026602>
 48. Hsu H. W. Time-dependent Nuclear Spin Polarization, Effects of Device Non-uniformity on the Gunn Effect, and Electron Spin Dynamics at High Electric Fields in GaAs: A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Applied Physics) in The University of Michigan. 2022. <https://doi.org/10.7302/6107>
 49. Prokhorov E. D., Beleckij N. I. *Poluprovodnikovye materialy dlya priborov s mezhdolinnyim perekhodom elektronov* [Semiconductor materials for devices with intervalley electron transfer]. Kharkov, Kharkov University Publ., 1982. 144 p. (in Russian).
 50. Borodovskij P. A., Osadchij V. M. *Mezhdolinnyj perenos elektronov v poluprovodnikakh A³B⁵* [Intervalley electron transfer in A³B⁵ semiconductors]. Novosibirsk, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1987. 171 p. (in Russian).
 51. Poresh S. B., Tager A. S., Kal'fa A. A. Mathematical modeling and computer analysis of high-frequency characteristics of Gunn diodes. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Ehlektronika SVCH* [Electronic Equipment. Ser. 1. Microwave Electronic Technology], 1976, iss. 10, pp. 19–31 (in Russian).
 52. Copeland J. A. LSA oscillator waveforms for high efficiency. *Proc. IEEE*, 1969, vol. 57, no. 9, pp. 1666–1667. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7358>
 53. Golant E. I., Kal'fa A. A., Poresh S. B., Tager A. S. Computer simulation of Gunn diodes in the millimeter wavelength range. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Ehlektronika SVCH* [Electronic Equipment. Ser. 1. Microwave Electronic Technology], 1981, iss. 7, pp. 23–28 (in Russian).
 54. Kal'fa A. A., Poresh S. B., Tager A. S. The Gunn effect at high frequencies. *Obzory po ehlektronnoj tekhnike. Ser. 1. Elektronika SVCH* [Reviews on electronic equipment. Ser. 1. Microwave Electronics]. Moscow, CRI "Electronics" Publ., 1984, iss. 4. 34 p. (in Russian).



55. Mihajlov A. I., Mitin A. V. Analysis of current nonlinear dynamics in long high-resistivity samples of *n*-GaAs under local light action. Pt. 1. Formulation of the model. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2007, vol. 10, no. 2, pp. 49–56 (in Russian). EDN: LBDLCB
56. McCumber D. E., Chynoweth A. G. Theory of negative-conductance amplification and of Gunn instabilities in “two-valley” semiconductors. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1966, vol. ED-13, iss. 1, pp. 4–21. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1966.15629>
57. Chajka V. E. Comparison of two-temperature and single-temperature models of the Gunn diode. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCH* [Electronic Equipment. Ser. 1. Microwave Electronics], 1979, iss. 1, pp. 99–100 (in Russian).
58. Mikhailov A. I. An improved version of the single-temperature model of the Gunn effect in gallium arsenide. *Radioelectronics and Communications Systems*, 1999, vol. 42, no. 10, pp. 46–50 (in Russian). EDN: YNBQWI
59. Blotekaer K. Transport equations for electrons in two-valley semiconductors. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1970, vol. ED-17, iss. 1, pp. 38–47. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1970.16921>
60. Mikhailov A. I., Razumikhin K. A. Studying the electron dynamics in semiconductor gunn diode structures by means of two-temperature model. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2006, vol. 9, no. 2, pp. 74–78 (in Russian). EDN: MTHHVX
61. Hsu H. W., Sih V. Illumination-induced modulation of conductivity and Gunn oscillation properties in epitaxial GaAs. *J. Appl. Phys.*, 2021, vol. 129, iss. 9, art. 095701. <https://doi.org/10.1063/5.0041508>
62. Hsu H. W., Dominguez M. J., Sih V. Gunn threshold voltage characterization in GaAs devices with wedge-shaped tapering. *J. Appl. Phys.*, 2020, vol. 128, iss. 7, art. 074502. <https://doi.org/10.1063/5.0016101>
63. Bobreshov A. M., Nesterenko Yu. N., Razuvaev Yu. Yu. Field and charge distribution in the junction between *n*-GaAs and a semi-insulating chromium-doped substrate. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 50–55 (in Russian).
64. Martin G. M., Farges J. P., Jacob G., Hallais J. P., Poiblaud G. Compensation mechanisms in GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1980, vol. 51, iss. 5, pp. 2840–2852. <https://doi.org/10.1063/1.327952>
65. Rees G. J., ed. *Semi-Insulating III–V Materials*. Nottingham, Shiva Publ., 1980. 361 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-9193-7>
66. Mikhailov A. I., Mitin A. V. Analysis of current nonlinear dynamics in long high-resistivity samples of *n*-GaAs under local light action. Pt. 2. Results of modeling. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2010, vol. 13, no. 1, pp. 73–81 (in Russian).
67. Aut I., Gencov D., German K. *Fotoelektricheskie yavleniya* [Photoelectric phenomena]. Moscow, Mir, 1980. 208 p. (in Russian).
68. Ryvkin S. M. *Fotoelektricheskie yavleniya v poluprovodnikakh* [Photoelectric phenomena in semiconductors]. Moscow, Fizmatgiz, 1963. 494 p. (in Russian).
69. Rose A. *Concepts in Photoconductivity and Allied Problems. Interscience tracts on Physics and Astronomy, vol. 19*. New York, Interscience Publishers, 1963. 168 p.
70. Rokakh A. G. *Fotoelektricheskie yavleniya v poluprovodnikakh i dielektrikakh: uchebnoe posobie* [Photoelectric phenomena in semiconductors and dielectrics: A textbook]. Saratov, Saratov State University Publ., 1984. 158 p. (in Russian).
71. Fistul’ V. I. *Vvedenie v fiziku poluprovodnikov: Uchebnoe posobie* [Introduction to semiconductor Physics: Textbook]. Moscow, Vysshaya shkola, 1984. 352 p. (in Russian).
72. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. New York, John Wiley and Sons Inc., 1981. 868 p.
73. Thim H. W. Computer study of bulk GaAs devices with random one-dimensional doping fluctuations. *J. Appl. Phys.*, 1968, vol. 39, iss. 8, pp. 3897–3904. <https://doi.org/10.1063/1.1656872>
74. Dalal V. L., Dreeben A. B., Triano A. Temperature dependence of hole velocity in *p*-GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1971, vol. 42, iss. 7, pp. 2864–2867. <https://doi.org/10.1063/1.1660641>
75. Blakemore J. S. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide. *J. Appl. Phys.*, 1982, vol. 53, iss. 10, pp. R123–R181. <https://doi.org/10.1063/1.331665>
76. Levinshtein M. E., Rumyantsev S. L., Shur M. S. *Handbook Series on Semiconductor Parameters: in 5 vols*. Singapore, World Scientific, 1996. Vol. 1. 237 p.
77. Dargys A., Kundrotas J. *Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP*. Vilnius, Science and Encyclopedia Publishers. 1994. 264 p.
78. Poresh S. B., Tager A. S. Theoretical study of generators on diodes with intervalley transfer of electrons. *Radiotekhnika i elektronika* [Radioengineering and Electronics], 1978, vol. 23, no. 4, pp 834–840.
79. Milnes A. G. *Deep impurities in semiconductors*. New York, Wiley. 1973. 520 p.
80. Das B., Aguilera I., Rau U., Kirchartz T. What is a deep defect? Combining Shockley-Read-Hall statistics with multiphonon recombination theory. *Phys. Rev. Materials*, 2020, vol. 4, no. 2, art. 024602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.024602>
81. Kolesnikova I. A., Kobtsev D. A., Redkin R. A., Voevodin V. I., Tyazhev A. V., Tolbanov O. P., Sarkisov Y. S., Sarkisov S. Y., Atuchin V. V. Optical pump–terahertz probe study of HR GaAs:Cr and SI GaAs:El2 structures with long charge carrier lifetimes. *Photonics*, 2021, vol. 8, no. 12, art. 575. <https://doi.org/10.3390/photonics8120575>
82. Hludkov S. S., Tolbanov O. P., Vilisova M. D., Prudaev I. A. *Poluprovodnikovye pribory na osnove arsenida galliya s glubokimi primesnymi centrami* [Semiconductor devices based on gallium arsenide with deep impurity centers]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2016. 256 p. (in Russian).
83. Ringel S. A., Rohatgi A. The effects of trap-induced lifetime variations on the design and performance of high-efficiency GaAs solar cells. *IEEE Trans. Elec-*



- tron Devices, 2002, vol. ED-38, iss. 11, pp. 2402–2409. <https://doi.org/10.1109/16.97400>
84. Mihailov A. I., Mitin A. V. Influence of charge carriers lifetime on field and current dynamics in gallium arsenide-based structures in conditions of localized illumination. *III NAUCHNYJ FORUM TELEKOM-UNIKACII: TEORIYA I TEKHNologii TTT-2019. Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov FITPVP-2019: Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [III SCIENTIFIC FORUM ON TELECOMMUNICATIONS: THEORY AND TECHNOLOGIES TTT-2019. Physics and Technical Applications of Wave Processes FITPVP-2019: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, Kazan, November 19–22, 2019]. Kazan, A. N. Tupolev Kazan State Technical University Publ., vol. 3, pp. 22, 23 (in Russian). EDN: EUPDDC*
85. Mikhailov A. I., Mitin A. V. Experimental investigation of current oscillations spectrum in long high-resistivity planar-epitaxial gallium arsenide structures under light action. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2011, vol. 14, no. 4, pp. 87–91 (in Russian). EDN: ONZHCH
86. Mikhailov A. I., Mitin A. V., Kozhevnikov I. O. Functional single-chip light-to-frequency converter based on high-resistivity *n*-GaAs. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2014, vol. 17, no. 4, pp. 64–69 (in Russian). EDN: TJHXWT
87. Mikhailov A. I., Mitin A. V., Kozhevnikov I. O. Peculiarities of stable oscillations of high amplitude current occurring in long high-impedance planar-epitaxial gallium-arsenide-based structures. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2015, vol. 58, no. 4, pp. 59–64 (in Russian). EDN: UCHEYH
88. Mikhailov A. I., Kozhevnikov I. O., Mitin A. V. Investigation of the possibility of implementing a mid-frequency broadband swept-frequency generator based on the structure of semi-insulating gallium arsenide. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 4, pp. 412–417 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-4-412-417>, EDN: MNXTBZ
89. Kozhevnikov I. O., Mikhailov A. I., Bratashov D. N. Investigation of the influence of the topology of contact pads on the reproducibility of current oscillation parameters in mesoplanar structures based on semi-insulating gallium arsenide]. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2015, vol. 15, iss. 1, pp. 51–56 (in Russian).

Поступила в редакцию 05.12.2025; одобрена после рецензирования 10.04.2026;
принята к публикации 15.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 05.12.2025; approved after reviewing 10.04.2026;
accepted for publication 15.04.2026; published 30.06.2026



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 210–217

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 210–217

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-210-217>, EDN: UKFVOC

Научная статья

УДК 538.915

Влияние диаметра отверстия и карбонильных групп на электронные свойства тонких плёнок перфорированного графена с почти круглыми отверстиями



П. В. Барков^{1✉}, М. М. Слепченков¹, О. Е. Глухова^{1,2}

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

²Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Россия, 119991, г. Москва, ул. Большая Пироговская, д. 2, стр. 4

Барков Павел Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиотехники и электродинамики, barkovssu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2167-1615>, AuthorID: 932768

Слепченков Михаил Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиотехники и электродинамики, slepchenkovm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4282-5620>, AuthorID: 712909

Глухова Ольга Евгеньевна, доктор физико-математических наук, ¹заведующий кафедрой радиотехники и электродинамики; ²ведущий научный сотрудник лаборатории биомедицинских нанотехнологий, glukhova@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5670-2058>, AuthorID: 33028

Аннотация. В настоящее время перфорированный графен является одним из наиболее перспективных представителей семейства углеродных наноматериалов благодаря своим электронным, оптическим, каталитическим и сенсорным свойствам. Особый интерес для исследователей представляет выявление закономерностей управления свойствами перфорированного графена за счет модификации его атомного строения. Целью данной работы является установление закономерностей изменения электронных свойств тонких плёнок перфорированного графена с отверстиями почти круглой формы диаметром 1, 1.5 и 2 нм при наличии на поверхности перфорированного графена карбонильных групп и атомов водорода. Исследование проводилось с применением самосогласованного метода функционала электронной плотности в схеме сильной связи (SCC DFTB). Все расчеты проводились для температуры 300 К. Выполнена оценка термодинамической устойчивости плёнок перфорированного графена в ходе функционализации. Электронные свойства анализируются на основе рассчитанных энергетических зонных диаграмм. Проводится анализ трансфера заряда в системе «перфорированный графен + карбонильные группы + атомы водорода» на основе рассчитанных распределений парциальных зарядов по Малликену по атомам супер-ячеек исследуемых плёнок. Показана высокая чувствительность размера энергетической щели плёнок перфорированного графена к функционализации для диаметра отверстия 1 нм; по сравнению с чистой поверхностью плёнок перфорированного графена щель увеличилась вдвое. Таким образом, размер отверстий и функционализация краев являются двумя важными факторами, влияющими на свойства перфорированного графена. Эти результаты показывают, что перфорированный графен, функционализированный карбонильными группами, является перспективным материалом в полупроводниковых устройствах.

Ключевые слова: зонная структура, энергетическая щель, уровень Ферми, парциальный атомный заряд

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-72-00202, <https://rscf.ru/project/25-72-00202/>).

Для цитирования: Барков П. В., Слепченков М. М., Глухова О. Е. Влияние диаметра отверстия и карбонильных групп на электронные свойства тонких плёнок перфорированного графена с почти круглыми отверстиями // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 210–217. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-210-217>, EDN: UKFVOC

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

Article

Influence of hole diameter and carbonyl groups on the electronic properties of thin films of perforated graphene with almost circular holes

P. V. Barkov^{1✉}, M. M. Slepchenkov¹, O. E. Glukhova^{1,2}

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

²I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, 2–4 Bolshaya Pirogovskaya St., Moscow 119991, Russia

© Барков П. В., Слепченков М. М., Глухова О. Е., 2026



Pavel V. Barkov, barkovssu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2167-1615>, AuthorID: 932768

Mikhail M. Slepchenkov, slepchenkovm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4282-5620>, AuthorID: 712909

Olga E. Glukhova, glukhovaoe@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5670-2058>, AuthorID: 33028

Abstract. Background and Objectives: Perforated graphene is currently one of the most promising members of the carbon nanomaterial family due to its electronic, optical, catalytic, and sensor properties. Of particular interest to researchers is identifying patterns in controlling perforated graphene properties by modifying its atomic structure. The aim of this study is to establish patterns in the electronic properties of perforated graphene thin films with nearly circular holes of 1 nm, 1.5 nm, and 2 nm in diameter in the presence of carbonyl groups and hydrogen atoms on the perforated graphene surface. **Materials and Methods:** The study was conducted using the self-consistent charge density functional tight-binding method. All calculations were performed at a temperature of 300 K. **Results:** The thermodynamic stability of the perforated graphene films during functionalization has been assessed. The electronic properties are analyzed based on the calculated energy band diagrams. An analysis of charge transfer in the “Perforated graphene PG + Carbonyl groups + Hydrogen atoms” system has been conducted based on calculated Mulliken partial charge distributions across the atoms of the supercells of the studied films. A high sensitivity of the energy gap size of the perforated graphene films to functionalization has been demonstrated; for a hole diameter of 1 nm, the gap doubled compared to the clean surface of the perforated graphene films. **Conclusion:** Thus, hole size and edge functionalization are two important factors influencing the properties of perforated graphene. These results demonstrate that perforated graphene functionalized with carbonyl groups is a promising material for semiconductor devices.

Keywords: band structure, energy gap, Fermi level, partial atomic charge

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-72-00202, <https://rscf.ru/project/25-72-00202/>).

For citation: Barkov P. V., Slepchenkov M. M., Glukhova O. E. Influence of hole diameter and carbonyl groups on the electronic properties of thin films of perforated graphene with almost circular holes. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 210–217 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-210-217>, EDN: UKFVOC

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

Введение

Одной из актуальных задач науки о материалах является экспериментальное получение и изучение свойств пористых двумерных наноматериалов [1]. К числу наиболее перспективных представителей этого класса наноматериалов относится перфорированный графен (ПГ), в базальной плоскости которого имеется множество пор (отверстий), размер, форма и плотность которых регулируются с помощью различных методов синтеза [2]. Для создания отверстий в базальной плоскости графена используются химические и физические методы: химическое травление, высокотемпературный нагрев, фотокаталитическое окисление, химическое осаждение из паровой фазы (CVD), ионная бомбардировка, реактивное ионное травление и литография буферного слоя [3–5]. Структуры ПГ обладают большой площадью поверхности и высокой плотностью отверстий, что обеспечивает множество активных участков для миграции и хранения ионного заряда [6, 7]. Это приводит к увеличению накопления заряда за счет полного внедрения / извлечения ионов электролита и противодействует проблемам расширения / сжатия объема электрода в системах накопления энергии [8–12]. Кроме того, материалы на основе ПГ действуют как мембрана для разделения молекулярных ионов, позволяя определенным молекулам/ионам проходить

через них, ограничивая при этом прохождение других, тем самым играя важную роль в системах опреснения воды [13]. Также ПГ находит применение в наноэлектронике при создании полевых транзисторов, играя роль проводящего канала [14, 15]. Опытный образец нанотранзистора на основе нанолента ПГ шириной до 10 нм, изготовленных с использованием наноимпринтной литографии, продемонстрирован в работе [14]. Установлено, что отношение токов I_{on}/I_{off} разработанного транзисторного устройства увеличивается с уменьшением ширины наноленты ПГ и при 10 нм приближается к отметке 100 в условиях комнатной температуры. Эффективность использования ПГ в качестве чувствительного элемента сенсорных устройств, в том числе газовых, подтверждена в работах [16–18]; в частности, создан и испытан электрохимический сенсор с чувствительным элементом, в роли которого выступает функционализированный азотом ПГ [18]. Разработанный датчик показал высокую чувствительность, широкий линейный диапазон, сверхнизкий предел обнаружения, превосходную стабильность и отсутствие помех.

Важной задачей при создании устройств на основе ПГ является реализация возможности управления физическими свойствами наноматериалов ПГ. Поиск оптимальных вариантов решения этой задачи в настоящее время осуществляется, в том числе с помощью методов



атомистического моделирования. В работе [19], используя методы *ab initio*, авторы показали, что ширина запрещённой зоны ПГ чувствительна к форме отверстий: в случае отверстий почти круглой формы структуры ПГ обладают большей шириной запрещенной зоны, чем в случае отверстий прямоугольной и треугольной форм. Кроме того, как отмечают авторы работы [20], проведя расчеты в рамках теории функционала плотности (DFT), размер энергетической щели между валентной зоной и зоной проводимости чувствителен к тому, вдоль какого из двух направлений гексагональной решётки – «zigzag» или «armchair» – расположены отверстия в массиве.

Помимо изменения геометрических параметров другим важным фактором, оказывающим влияние на электронную структуру и электронно-энергетические характеристики ПГ, является наличие на его поверхности функциональных групп. В наших предыдущих исследованиях рассматривалось влияние карбоксильных (COOH) [21] и карбонильных (C=O) [22] функциональных групп на энергетические характеристики и электрофизические свойства тонких плёнок ПГ с отверстиями почти круглой формы фиксированного диаметра (~1.5 нм) при различных значениях ширины шейки. В данной публикации нами рассматривается одновременное влияние диаметра отверстия и функционализации поверхности ПГ C=O группами на электронные и электропроводные свойства тонких плёнок ПГ с отверстиями почти круглой формы.

1. Методы исследования

Базовым методом, выбранным для проведения исследований, являлся самосогласованный метод функционала электронной плотности в схеме сильной связи (SCC DFTB) [23]. Расчёты проводились в программном пакете открытого доступа DFTB+ с использованием набора параметров Слэтера–Костера rbc-0-3, обеспечивающих наилучшее соответствие расчётных значений геометрических и энергетических характеристик углеродных наноструктур данным эксперимента [24]. Равновесная конфигурация суперъячеек плёнок ПГ находилась путём минимизации полной энергии суперъячеек по координатам всех атомов и по длинам векторов трансляции. Критерием оптимизации являлось достижение значения межатомных сил менее 10^{-4} эВ·Å⁻¹. Расчёты энергетических зонных диаграмм выполнялись для температуры 300 К.

Обход первой зоны Бриллюэна, представлявшей собой прямоугольник, осуществлялся по её высокосимметричным точкам в направлении М–Г–J–K–Г.

2. Атомистическая модель объекта исследования

В работе рассматриваются тонкие плёнки ПГ с формой отверстий, близкой к круглой, и значениями диаметра 1, 1.5 и 2 нм. Ранее экспериментально было показано, что плёнки ПГ с такой формой отверстия характеризуются более высокой структурной стабильностью по сравнению с отверстиями другой формы (треугольник, прямоугольник) [26]. Значения ширины шейки (наименьшее расстояние между краями соседних отверстий) были фиксированными для структур ПГ с выбранными диаметрами отверстий и составляли $W_x = 0.74$ нм (вдоль направления «zigzag» гексагональной решетки) и $W_y = 0.99$ нм (вдоль направлении «armchair» гексагональной решетки). Геометрические параметры моделируемых структур отвечают данным натурального эксперимента по синтезу ПГ [27]. Для каждой построенной суперъячейки плёнок ПГ проводилось моделирование процесса поэтапной функционализации поверхности ПГ C=O группами с помощью оригинального подхода, подробно изложенного в работе [28]. Функциональные группы присоединились ковалентными связями к атомам по краям отверстия ПГ, характеризующимся наибольшей величиной избыточного парциального (маллиkenового) заряда. С целью предотвращения формирования ковалентных связей между ближайшими соседями атома ПГ, к которому присоединяется C=O группа, и самой C=O группой к этим соседним углеродным атомам ковалентно присоединялись атомы водорода. Функционализация прекращалась, когда все атомы по краям отверстия суперъячейки были насыщены C=O группами. Для суперъячейки с диаметром отверстия 1 нм насыщение наступало при присоединении 6 функциональных групп (рис. 1, а), для суперъячейки с диаметром отверстия 1.5 нм – при присоединении 9 групп (рис. 1, б) и для суперъячейки с диаметром отверстия 2 нм – при присоединении 12 групп (рис. 1, в) при фиксированной ширине шейки.

3. Результаты и их обсуждение

В ходе моделирования поэтапной функционализации отверстия ПГ проводилась оценка термодинамической устойчивости системы

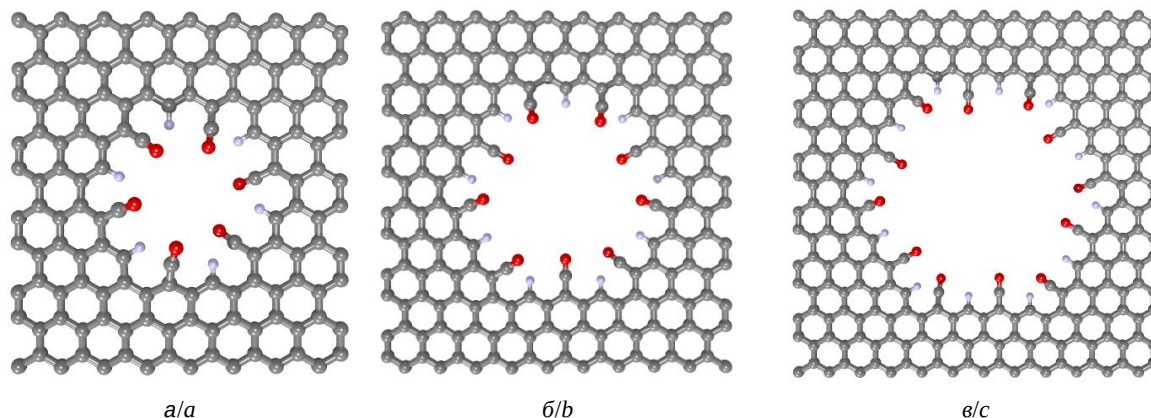


Рис. 1. Суперъёмки тонких плёнок перфорированного графена с присоединёнными С=О группами и атомами водорода с диаметрами отверстий 1 (а), 1.5 (б) и 2 нм (в). Ширина шейки $W_x = 0.74$ нм, $W_y = 0.99$ нм (цвет онлайн)

Fig. 1. Supercells of thin films of perforated graphene with attached C=O groups and hydrogen atoms with hole diameters of 1 (a), 1.5 (b) and 2 nm (c). Neck width $W_x = 0.74$ nm, $W_y = 0.99$ nm (color online)

«ПГ + С=О группы + водород» по величине энергии связи E_b :

$$E_b = E_{gr+nC=O+mH} - E_{gr} - E_{nC=O} - E_{mH}, \quad (1)$$

где E_{gr} – энергия нефункционализованного ПГ, $E_{gr+nC=O+mH}$ – энергия суперъёмки ПГ с присоединёнными С=О группами и атомами водорода, $E_{nC=O}$ – энергия С=О групп (n – число функциональных групп), E_{mH} – энергия атомов водорода (m – число атомов водорода). Результаты расчётов показали, что E_b изменяется: в интервале от -1.3 до -12.7 эВ при диаметре отверстия 1 нм; в интервале от -1.6 до -12.8 эВ при диаметре отверстия 1.5 нм и в интервале от -1.7 до -7.3 эВ при диаметре отверстия 2 нм. Полученные отрицательные значения энергии связи E_b свидетельствуют о термодинамической устойчивости системы «ПГ + С=О группы + водород» на каждом этапе функционализации поверхности ПГ.

Далее проводился анализ электронного строения функционализированных плёнок ПГ с отверстиями разного диаметра на основе результатов расчёта их зонной структуры. Рассчитанные энергетические диаграммы плёнок ПГ с полностью насыщенными атомами по краям отверстий показаны на рис. 2 для интервала энергии вблизи уровня Ферми. Хорошо видно, что плёнки ПГ с диаметром отверстия 1.5 нм (рис. 2, б) характеризуются почти нулевой щелью ($E_g = 0.02$ эВ) между валентной зоной и зоной проводимости, в то время как плёнки ПГ с диаметрами отверстия 1 нм (рис. 2, а) и 2 нм (рис. 2, в) имеют заметную энергетическую щель в 0.27 и 0.33 эВ соответственно.

Для установления характера влияния С=О групп и атомов водорода на электронное строение плёнок ПГ с разными диаметрами отверстий на рис. 3 приведены энергетические зонные диаграммы вблизи уровня Ферми для чистых плёнок ПГ. Сравнение зонных диаграмм на рис. 2 и 3 демонстрирует, что наличие присоединённых С=О групп и атомов водорода оказывает наибольшее влияние на размер энергетической щели в случае плёнок ПГ с диаметром отверстия 1 нм. Для чистого ПГ с таким диаметром отверстия величина E_g составляет 0.13 эВ. Следовательно, наличие С=О групп и атомов водорода приводит к расширению энергетической щели ПГ почти вдвое по сравнению с чистым ПГ. В случае плёнок ПГ с двумя другими диаметрами отверстий (1.5 нм и 2 нм) размер энергетической щели практически не изменяется при полном насыщении атомов по краям отверстий ПГ. Для плёнок чистого ПГ с диаметрами 1.5 нм и 2 нм размер энергетической щели составил 0.02 и 0.31 эВ соответственно. В то же время для всех рассмотренных плёнок ПГ с разными диаметрами отверстий наблюдается смещение положения уровня Ферми по оси энергий вверх (в направлении 0 эВ) при функционализации, что свидетельствует об изменении электронной структуры ПГ, заключающемся в расширении валентной зоны. В зависимости от диаметра отверстия величина смещения уровня Ферми количественно различается, но в каждом из рассмотренных случаев она составила более 1 эВ: при диаметре отверстия 1 нм наблюдается сдвиг уровня Ферми с -5.16 до -4.26 эВ, в двух других случаях – с -5.47 до -4.09 эВ (диаметр отверстия

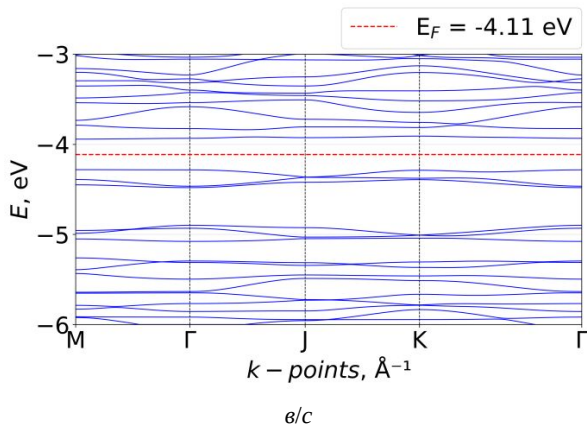
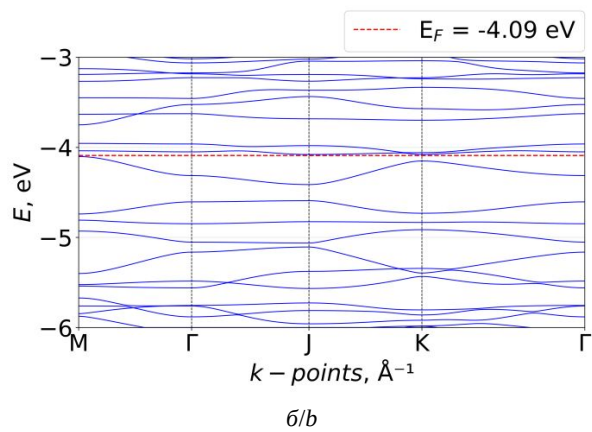
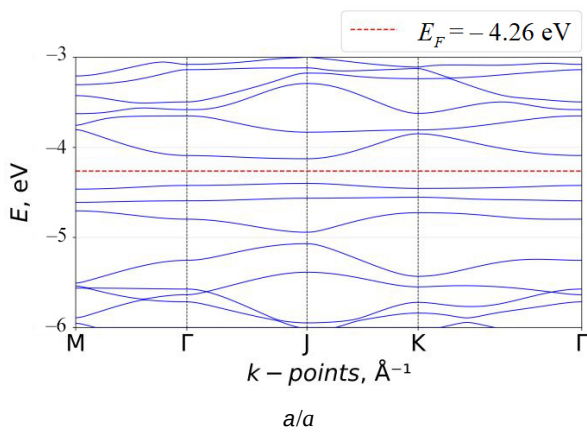


Рис. 2. Энергетические зонные диаграммы перфорированного графена с присоединёнными С=О группами и атомами водорода вблизи уровня Ферми (красная горизонтальная пунктирная линия) с диаметром: 1 нм (а), 1.5 нм (б), 2 нм (в) (цвет онлайн)

Fig. 2. Energy band diagrams of perforated graphene with attached C=O groups and hydrogen atoms near the Fermi level (marked with a red horizontal dotted line): with a hole diameter: of 1 nm (a), of 1.5 nm (b), of 2 nm (c) color online

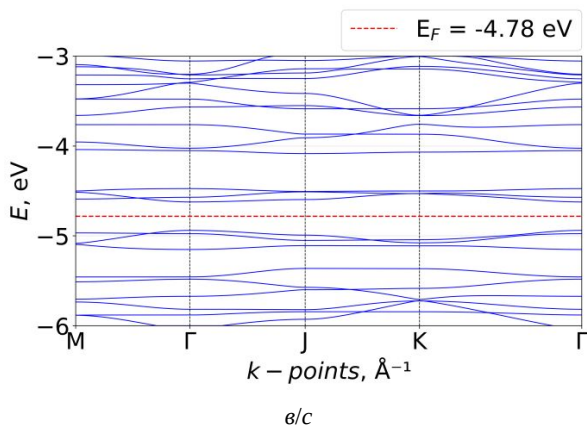
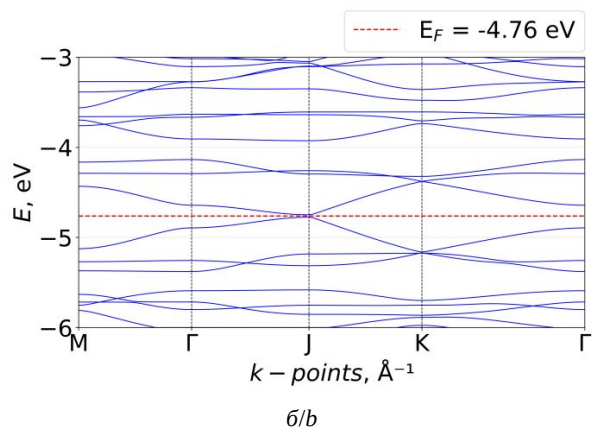
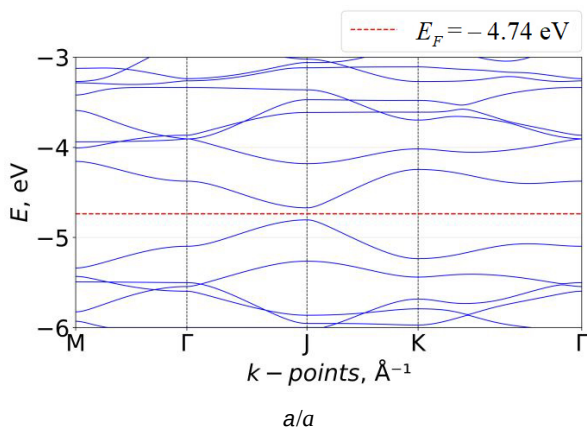


Рис. 3. Энергетические зонные диаграммы чистого перфорированного графена вблизи уровня Ферми (красная горизонтальная пунктирная линия) с диаметром отверстия: 1 нм (а), 1.5 нм (б), 2 нм (в) (цвет онлайн)

Fig. 3. Energy band diagrams of pure perforated graphene near the Fermi level (marked with a red horizontal dotted line): with a hole diameter: of 1 nm (a), of 1.5 nm (b), of 2 nm (c) color online



1.5 нм) и с -5.69 до -4.11 эВ (диаметр отверстия 2 нм).

Для объяснения наблюдаемых изменений в электронном строении плёнок ПГ в процессе функционализации был выполнен анализ трансфера заряда в системе «ПГ + С=О группы + водород» на основе рассчитанных распределений парциальных (маллиkenовых) зарядов. Распределения парциального заряда для каждой из рассматриваемых суперъячеек ПГ с полностью насыщенными атомами по краям отверстий приведены на рис. 4. Анализ показал, что ковалентное присоединение С=О групп и атомов водорода к поверхности ПГ индуцирует трансфер заряда на атомы ПГ с функциональных групп и водорода, что приводит к увеличению избыточного положительного заряда в системе «ПГ + С=О группы + водород». С ростом диаметра отверстия величина парциального заряда, перешедшего на атомы ПГ, возрастает, поскольку максимальное число присоединяемых к атомам по краям отверстия функциональных групп и атомов водорода возрастает с 6 до 12. Для суперъячейки ПГ с диаметром отверстия 1 нм суммарная величина отданного на ПГ заряда составила $1.6|e|$, для суперъячейки ПГ с диаметром отверстия 1.5 нм – $2.51|e|$ и для суперъячейки ПГ с диаметром отверстия 2 нм – $3.37|e|$.

Была также определена доля парциально-го заряда, переданного каждой функциональной группой и каждым атомом водорода в от-

дельности на каждом этапе функционализации поверхности ПГ. Установлено, что величина парциального заряда, переданного с атомов С=О групп на ПГ, в 2–5 раз больше (с увеличением числа присоединяемых функциональных групп), чем величина парциального заряда, переданного на ПГ атомами водорода.

Таким образом, трансфер заряда с С=О групп и атомов водорода на ПГ обуславливает отмеченные выше изменения электронного строения (возрастание величины переданного на ПГ парциального заряда), в том числе тот факт, что уровень Ферми функционализированного ПГ изменяется в более широких пределах с увеличением диаметра отверстия ПГ.

Заключение

Квантовым методом SCC DFTB было проведено исследование влияния диаметра отверстия на электронно-энергетические характеристики и электронные свойства тонких плёнок ПГ, поверхность которых функционализирована карбонильными группами и атомами водорода. Основываясь на результатах расчёта энергии связи, было установлено, что для всех рассмотренных диаметров отверстия (1, 1.5 и 2 нм) процесс ковалентной функционализации поверхности ПГ является энергетически выгодным, и система «ПГ + С=О группы + атомы водорода» характеризуется высокой термодинамической устойчивостью.

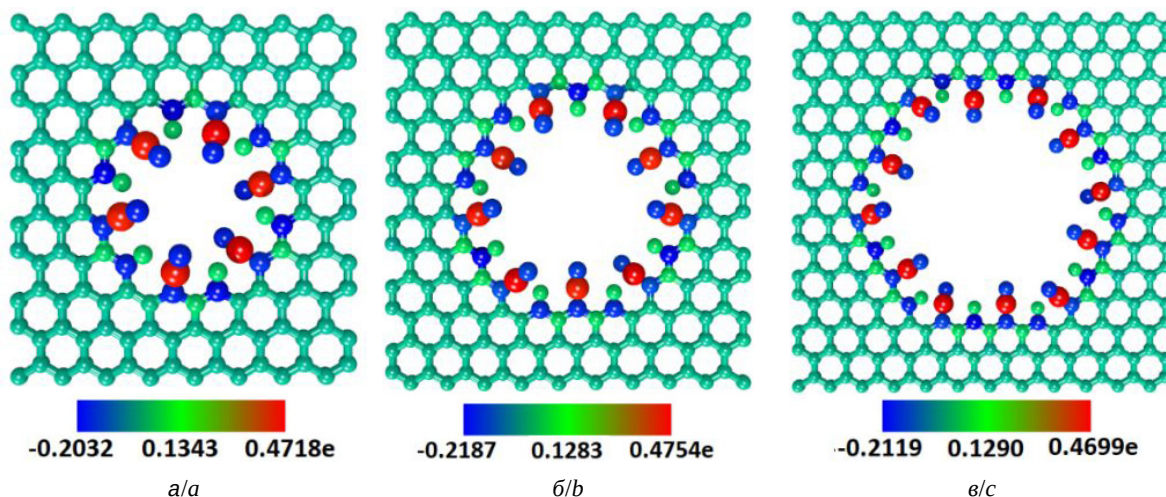


Рис. 4. Распределение парциального (маллиkenового) заряда по атомам суперъячейки перфорированного графена, функционализированного С=О группами и атомами водорода с диаметром отверстия: 1 нм (а), 1.5 нм (б), 2 нм (в) (цвет онлайн)

Fig. 4. Distribution of partial (mulliken) charge over the atoms of the supercell of perforated graphene functionalized with C=O groups and hydrogen atoms: with a hole diameter: of 1 nm (a), of 1.5 nm (b), of 2 nm (c) (color online)



Анализ рассчитанных распределений парциального (маллиkenового) заряда и энергетических зонных диаграмм позволил выявить следующие физические закономерности: ковалентное присоединение С=О групп и атомов водорода к атомам по краям отверстия ПГ приводит к смещению уровня Ферми ПГ вверх по оси энергий (в направлении дна зоны проводимости) и увеличению избыточного положительного заряда в системе «ПГ + С=О группы + водород». Показана высокая чувствительность размера энергетической щели плёнок ПГ к функционализации в случае диаметра отверстия 1 нм: по сравнению с чистой поверхностью плёнок ПГ щель увеличилась вдвое.

Выявленные закономерности открывают предпосылки для создания на основе функционализированного кислород-содержащими группами ПГ различных полупроводниковых устройств с настраиваемыми электронно-энергетическими характеристиками.

Список литературы / References

1. Wang D., Dou Y., Zhang X., Bi K., Panneerselvam I. R., Sun H., Jiang X., Dai R., Song K., Zhuang H., Lu Y., Wang Y., Liao Y., Ding L., Nian Q. Manufacturing and applications of multi-functional holey two-dimensional nanomaterials – A Review. *Nano Today*, 2024, vol. 55, art. 102162. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2024.102162>
2. Nazarian-Samani M., Haghghat-Shishavan S., Nazarian-Samani M., Kashani-Bozorg S. F., Ramakrishna S., Kim K.-B. Perforated two-dimensional nanoarchitectures for next-generation batteries: Recent advances and extensible perspectives. *Progr. Mater. Sci.*, 2021, vol. 116, art. 100716. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100716>
3. Bai J., Zhong X., Jiang S., Duan X. Graphene nanomesh. *Nature Nanotechnology*, 2010, vol. 5, pp. 190–194. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.8>
4. Yang J., Ma M., Li L., Zhang Y., Huang W., Dong X. Graphene nanomesh: New versatile materials. *Nanoscale*, 2014, vol. 6, pp. 13301–13313. <https://doi.org/10.1039/C4NR04584J>
5. Rajput N. S., Zadjali S. A., Gutierrez M., Esawi A. M. K., Teneiji M. A. Synthesis of holey graphene for advanced nanotechnological applications. *RSC Adv.*, 2021, vol. 11, pp. 27381–27405. <https://doi.org/10.1039/d1ra05157a>
6. Ma R., Zhou Y., Bi H., Yang M., Wang J., Liu Q., Huang F. Multidimensional graphene structures and beyond: Unique properties, syntheses and applications. *Progr. Mater. Sci.*, 2020, vol. 113, art. 100665. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100665>
7. Lin Y., Liao Y., Chen Zh., Connell J. W. Holey graphene: A unique structural derivative of graphene. *Mater. Res. Lett.*, 2017, vol. 5, pp. 209–234. <https://doi.org/10.1080/21663831.2016.1271047>
8. Liu T., Zhang L., Cheng B., Hu X., Yu J. Holey Graphene for Electrochemical Energy Storage. *Cell Reports Phys. Sci.*, 2020, vol. 1, art. 100215. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100215>
9. Yang C.-H., Huang P.-L., Luo X.-F., Wang C.-H., Li C., Wu Y.-H., Chang J.-K. Holey Graphene Nanosheets with Surface Functional Groups as High-Performance Supercapacitors in Ionic-Liquid Electrolyte. *Chem. Sus. Chem.*, 2015, vol. 8, pp. 1779–1786. <https://doi.org/10.1002/cssc.201500030>
10. Sammed K. A., Pan L., Asif M., Usman M., Cong T., Amjad F., Imran M. A. Reduced holey graphene oxide film and carbon nanotubes sandwich structure as a binder-free electrode material for supercapacitor. *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, art. 2315. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58162-9>
11. Su F., Zheng S., Liu F., Zhang X., Su F., Wu Z.-S. Nitrogen-doped holey graphene nanoscrolls for high-energy and high-power supercapacitors. *Chin. Chem. Lett.*, 2021, vol. 32, pp. 914–917. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2020.07.025>
12. Jeong J. H., Lee G.-W., Kim Y. H., Choi Y. J., Roh K. C., Kim K.-B. A holey graphene-based hybrid supercapacitor. *Chem. Eng. J.*, 2019, vol. 378, art. 122126. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122126>
13. Liu G., Jin W., Xu N. Graphene-based membranes. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, vol. 44, pp. 5016–5030. <https://doi.org/10.1039/C4CS00423J>
14. Kim M., Safron N. S., Han E., Arnold M. S., Gopalan P. Fabrication and Characterization of Large-Area, Semiconducting Nanoperforated Graphene Materials. *Nano Lett.*, 2010, vol. 10, pp. 1125–1131. <https://doi.org/10.1021/nl9032318>
15. Liang X., Jung Y. S., Wu S., Ismach A., Olynick D. L., Cabrini S., Bokor J. Formation of Bandgap and Subbands in Graphene Nanomeshes with Sub-10 nm Ribbon Width Fabricated via Nanoimprint Lithography. *Nano Lett.*, 2010, vol. 10, pp. 2454–2460. <https://doi.org/10.1021/nl100750v>
16. Sun Q., Dai M., Hong J., Feng S., Wang C., Yuan Z. Graphene Nanopore Fabrication and Applications. *Int. J. Mol. Sci.*, 2025, vol. 26, art. 1709. <https://doi.org/10.3390/ijms26041709>
17. Esfandiari A., Kybert N. J., Dattoli E. N., Han G. H., Lerner M. B., Akhavan O., Irajizad A., Johnson A. T. C. DNA-decorated graphene nanomesh for detection of chemical vapors. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, art. 183110. <https://doi.org/10.1063/1.4827811>
18. Chen Z., Zhang Y., Yang Y., Shi X., Zhang L., Jia G. Hierarchical nitrogen-doped holey graphene as sensitive electrochemical sensor for methyl parathion detection. *Sens. Actuators B Chem.*, 2021, vol. 336, art. 129721. <https://doi.org/10.1002/cssc.201501169>
19. Oswald W., Wu Z. Energy gaps in graphene nanomeshes. *Phys. Rev. B*, 2012, vol. 85, art. 115431. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.115431>
20. Tang G., Zhang Z., Deng X., Fan Z., Zeng Y., Zhou J. Improved scaling rules for bandgaps in graphene nanomeshes. *Carbon*, 2014, vol. 76, pp. 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.04.086>



21. Barkov P. V., Slepchenkov M. M., Glukhova O. E. Sensor properties of thin films of perforated graphene functionalized with COOH groups: DFTB study. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 4, pp. 485–494 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-4-485-494>
22. Barkov P. V., Slepchenkov M. M., Glukhova O. E. Influence of metric parameters on the electrical conductivity properties of thin films of perforated graphene functionalized with carboxyl groups. *Technical Physics*, 2025, vol. 95, iss. 5, pp. 954–960 (in Russian). <https://doi.org/10.61011/JTF.2025.05.60286.464-24>
23. Elstner M., Porezag D., Jungnickel G., Elsner J., Haugk M., Frauenheim Th., Suhai S., Seifert G. Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties. *Phys. Rev. B*, 1998, vol. 58, pp. 7260–7268. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.7260>
24. Aradi B., Hourahine B., Frauenheim Th. DFTB+, A sparse matrix-based implementation of the DFTB method. *J. Phys. Chem. A*, 2007, vol. 111, iss. 26, pp. 5678–5684. <https://doi.org/10.1021/jp070186p>
25. Kohn W. Nobel Lecture: Electronic structure of matter – wave functions and density functionals. *Reviews of Modern Physics*, 1999, vol. 71, iss. 5, pp. 1253–1266. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.71.1253>
26. Winter A., Ekinci Y., Götzhäuser A., Turchanin A. Freestanding carbon nanomembranes and graphene monolayers nanopatterned by EUV interference lithography. *2D Materials*, 2019, vol. 6, art. 021002. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab0014>
27. Rabchinskii M. K., Saveliev S. D., Stolyarova D. Yu., Brzhezinskaya M., Kirilenko D. A., Baidakova M. V., Ryzhkov S. A., Shnitov V. V., Sysoev V. V., Brunkov P. N. Modulating nitrogen species via N-doping and post annealing of graphene derivatives: XPS and XAS examination. *Carbon*, 2021, vol. 182, pp. 593–604. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.057>
28. Glukhova O. E., Barkov P. V. A new method for determining energetically favorable landing sites of carboxyl groups during the functionalization of graphene nanomesh. *Letters on Materials*, 2021, iss. 12, no. 4, pp. 392–396. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-392-396>

Поступила в редакцию 18.02.2026; одобрена после рецензирования 03.03.2026; принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 18.02.2026; approved after reviewing 03.03.2026; accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026



ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 218–224
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 218–224
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-218-224>, EDN: WGPPMC

Научная статья
УДК 538.956

Диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе бромид диизопропиламмония и микрочастиц меди

А. Ю. Милинский[✉], С. В. Барышников

Благовещенский государственный педагогический университет, Россия, 675000, г. Благовещенск,
ул. Ленина, д. 104

Милинский Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического и математического образования, a.milinskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7525-4396>, AuthorID: 662231

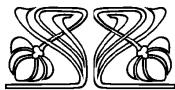
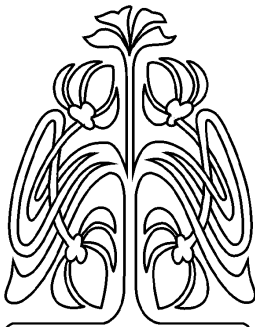
Барышников Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического и математического образования, svbar2003@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3362-8975>, AuthorID: 186300

Аннотация. В работе исследованы диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе органического сегнетоэлектрика бромида диизопропиламмония с добавлением 2 объемных процентов частиц меди размером около 1 мкм. Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к композитным системам на основе сегнетоэлектриков с добавлением металлических частиц, в которых проводящие включения способны существенно изменять термодинамический потенциал и параметры фазовых переходов сегнетоэлектрической матрицы. В отличие от хорошо изученных неорганических систем, влияние металлических частиц на свойства органических сегнетоэлектриков исследовано недостаточно. Образцы бромида диизопропиламмония и микрочастиц меди были получены методом механического смешения порошков с последующим прессованием. Морфология образца и распределение меди анализировались методом сканирующей электронной микроскопии. Диэлектрические свойства исследованы в диапазоне температур 30–170°C, а фазовые переходы дополнительно изучены методом дифференциального термического анализа. Для чистого бромида диизопропиламмония подтвержден сегнетоэлектрический фазовый переход первого рода при 153°C с характерным температурным гистерезисом. В композитах обнаружено существенное снижение температуры Кюри и расщепление фазового перехода на два при температурах 120 и 133°C. Появление двойного перехода интерпретируется как следствие микроскопической неоднородности системы и формирования областей бромида диизопропиламмония с различными граничными условиями вблизи межфазных границ с медью. Полученные результаты согласуются с феноменологическим подходом Ландау–Гинзбурга с учетом поверхностного вклада в свободную энергию. Показано, что металлические частицы меди эффективно модифицируют сегнетоэлектрическое состояние бромида диизопропиламмония, приводя к изменению эффективной температуры фазового перехода.

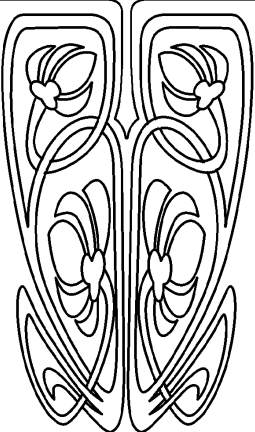
Ключевые слова: бромид диизопропиламмония, частицы меди, сегнетоэлектрик, композит, фазовые переходы, диэлектрическая проницаемость

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Благовещенского государственного педагогического университета.

© Милинский А. Ю., Барышников С. В., 2026



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Для цитирования: Милинский А. Ю., Барышников С. В. Диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе бромид диизопропиламмония и микрочастиц меди // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 218–224. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-218-224>, EDN: WGPPMC

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

Article

Dielectric and thermal properties of composites based on diisopropylammonium bromide and copper microparticles

A. Yu. Milinskiy[✉], S. V. Baryshnikov

Blagoveshchensk State Pedagogical University, 104 Lenina St., Blagoveshchensk 675000, Russia

Alexey Yu. Milinsky, a.milinskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7525-4396>, AuthorID: 662231

Sergey V. Baryshnikov, svbar2003@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3362-8975>, AuthorID: 186300

Abstract. Background and Objectives: Composite systems based on molecular ferroelectrics and metallic inclusions attract considerable attention due to the possibility of controlled modification of phase transition parameters and dielectric response. In contrast to extensively studied inorganic ferroelectric–metal composites, the influence of metallic microparticles on organic ferroelectrics remains insufficiently explored. Diisopropylammonium bromide is a promising organic ferroelectric characterized by a first-order phase transition and a relatively high spontaneous polarization. The aim of this work is to investigate the effect of 2 vol.% copper microparticles on the dielectric and thermal properties, Curie temperature, and phase transition behavior of diisopropylammonium bromide-based composites. **Materials and Methods:** Composite samples were prepared by mechanical mixing of diisopropylammonium bromide powder with Cu microparticles ($\approx 1 \mu\text{m}$) followed by pressing into pellets. Morphology and elemental distribution were examined by scanning electron microscopy. Dielectric permittivity was measured in the temperature range 30–170°C. Phase transitions were analyzed using differential thermal analysis. **Results:** Pure diisopropylammonium bromide exhibits a first-order ferroelectric–paraelectric transition at 426 K with thermal hysteresis. In the composite, a pronounced decrease in the Curie temperature and splitting of the phase transition into two peaks (≈ 120 and 133°C) have been observed. The splitting is attributed to microstructural heterogeneity and the formation of diisopropylammonium bromide regions with different interfacial boundary conditions in contact with Cu particles. **Conclusion:** Copper microparticles significantly modify the thermodynamic potential of the ferroelectric matrix due to interfacial screening and surface energy contributions. The observed reduction and splitting of the phase transition are consistent with the Landau–Ginzburg.

Keywords: ferroelectric, composite, phase transitions, third harmonic coefficient, permittivity

Acknowledgements: The work was supported by the Blagoveshchensk State Pedagogical University.

For citation: Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V. Dielectric and thermal properties of composites based on diisopropylammonium bromide and copper microparticles. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 218–224 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-218-224>, EDN: WGPPMC

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

Введение

В последние годы композитные материалы на основе сегнетоэлектриков с добавлением металлических частиц привлекают внимание исследователей в связи с возможностью целенаправленной модификации их электрических и термодинамических свойств [1, 2]. Введение проводящих включений в сегнетоэлектрическую матрицу позволяет изменять характер межфазных взаимодействий, экранирующие поля, доменную структуру и, как следствие, параметры фазовых переходов, включая температуру Кюри, диэлектрическую проницаемость и величину спонтанной поляризации. Подобные системы активно изучаются как экспериментально [3, 4], так и в рамках теоретических моделей [5], описывающих влияние металлических частиц на свободную энергию и поляризационное состояние сегнетоэлектрических материалов.

Наиболее подробно исследованы композиты на основе классических неорганических сегнетоэлектриков, прежде всего титаната бария [2–4]. Показано, что введение металлических частиц, таких как никель или медь, может приводить к заметному смещению температуры сегнетоэлектрического фазового перехода и изменению диэлектрического отклика материала. Эти эффекты связывают с перераспределением локальных электрических полей и усилением роли межфазных границ.

На этом фоне особый интерес представляет изучение органических сегнетоэлектриков, которые, в отличие от неорганических, обладают меньшей плотностью, технологичностью обработки и высокой чувствительностью к внешним воздействиям. Одним из перспективных представителей данного класса является бромид диизопропиламмония (diisopropylammonium bromide, DIPAB), известный своими сегнетоэлектрически-



ми свойствами [6, 7]. DIPAB характеризуется высокой величиной спонтанной поляризации (23 мкКл/см^2). Это делает его привлекательным для применения в функциональных элементах электроники [8, 9].

Несмотря на значительный интерес к объемным кристаллам DIPAB, влияние металлических частиц на его сегнетоэлектрические свойства до настоящего времени не исследованы. В то же время, учитывая полярную природу DIPAB и его чувствительность к электрическим полям, можно ожидать, что включение металлических частиц приведёт к существенным изменениям его физических свойств, как это наблюдалось для иодида диизопропиламмония [10].

В связи с этим целью настоящей работы является исследование диэлектрических и тепловых свойств композитов $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ на основе бромида диизопропиламмония с добавлением 2 об.% частиц меди размером 1 мкм (частицы меди занимают 2% от всего объема).

1. Объекты и методы исследования

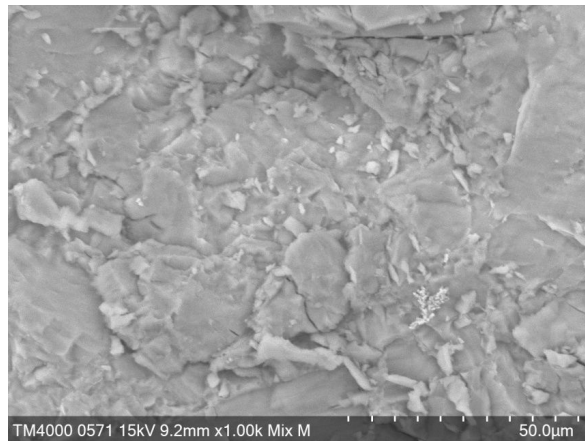
При комнатной температуре бромид диизопропиламмония кристаллизуется в сегнетоэлектрической фазе моноклинной сингонии. При нагревании до температуры порядка 152°C в системе реализуется структурный фазовый переход в неполярную моноклинную фазу. Установлено, что сегнетоэлектрический фазовый переход в DIPAB носит характер перехода первого рода [6].

Синтез бромид диизопропиламмония осуществлялся в соответствии с методикой, описанной в работе [11]. Композитные образцы состава $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ изготавливались путем совместного механического перемешивания порошкообразного DIPAB и медного порошка с характерным размером частиц около 2 и 1 мкм соответственно. Частицы меди относятся к кубической сингонии. Процесс смешивания проводился на вибрационной мельнице MM500 Control (Retsch GmbH, Германия) в течение 30 мин при частоте 30 Гц.

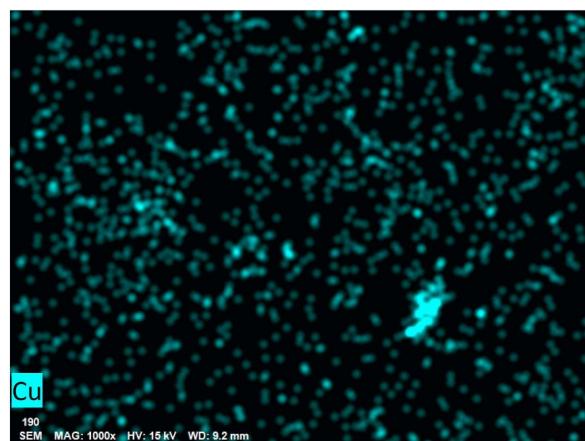
Исследование диэлектрических свойств осуществлялось с использованием измерителя E7-25 (МНИПИ, Беларусь). Нелинейные диэлектрические свойства исследовались при помощи авторской установки, описанной в [12, 13]. Для исследования методом дифференциального термического анализа (ДТА) применялся прибор

СТА РТ 1600 (Linseis, Германия). Исследования проводились в температурном интервале $30\text{--}170^\circ\text{C}$.

Для проведения экспериментальных измерений образцы DIPAB и композитов $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ прессовались под давлением $6000\text{--}7000 \text{ кг/см}^2$ в виде таблеток диаметром 12 мм и толщиной приблизительно 1 мм. Перед исследованием свойств композитов $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$, тщательно исследовалась морфология и распределение элементов в них при помощи электронного микроскопа TM4000 Plus (Hitachi, Япония). На рис. 1 показано СЭМ-изображение композита и распределения частиц меди в нем. По данным [14] частицы меди в микромасштабе в композитных средах часто распределялись неравномерно, подобно «заснеженным сосновым ветвям», что наблюдалось для наших образцов.



a/a



b/b

Рис. 1. Изображение поверхности композита $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ (a) и распределение в нем частиц меди (б)

Fig. 1. Image of the surface of the composite $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ (a) and the distribution of copper particles in it (b)



2. Результаты и их обсуждение

Температурные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' для образцов DIPAB приведены на рис. 2. На кривых $\epsilon'(T)$ при нагреве наблюдается выраженный максимум при температуре 153°C, что соответствует структурному фазовому переходу типа $P2_1 \rightarrow P2_1/m$ [6]. При охлаждении положение максимума ϵ' наблюдается при 150°C.

На рис. 2 также представлены температурные зависимости коэффициента третьей гармоники $\gamma_{3\omega}$. В режиме нагрева повышенные значения $\gamma_{3\omega}$ фиксируются в широком температурном интервале – от комнатной температуры до 153°C, что свидетельствует о наличии сегнетоэлектрического упорядочения. Выше 153°C $\gamma_{3\omega}$ изменяется слабо, что характерно для параэлектрического состояния вещества. При охлаждении заметный рост $\gamma_{3\omega}$ начинается при температуре около 149°C.

Результаты ДТА также подтверждают наличие единственного фазового перехода: при нагреве он наблюдается при температуре 153°C, тогда как при охлаждении – при 149°C (см. вставку на рис. 2). Обнаруженный температурный гистерезис согласуется с выводами, сделанными

на основании диэлектрических линейных и нелинейных измерений.

Экспериментальные данные, полученные для композитов $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ (рис. 3), свидетельствуют о существенном изменении положения фазовых переходов по сравнению с чистым DIPAB. По кривой $\epsilon'(T)$ установить температуру фазовых переходов проблематично, однако по данным ДТА четко прослеживаются два фазовых перехода при нагреве с максимумом сигнала при 120 и 133°C. Это указывает на снижение температуры Кюри при введении металлических частиц Cu и появлению второго фазового перехода. Оба фазовых перехода являются переходами первого рода, потому что присутствует температурный гистерезис.

Появление двух фазовых переходов можно интерпретировать как следствие микроскопической неоднородности композита. В системе формируются два типа областей DIPAB: частицы, находящиеся в контакте с металлическими частицами, и частицы, непосредственно не контактирующие с частицами меди. Для первого типа частиц сегнетоэлектрический переход происходит при более низкой температуре (~120°C), тогда как для второго типа с косвенным вли-

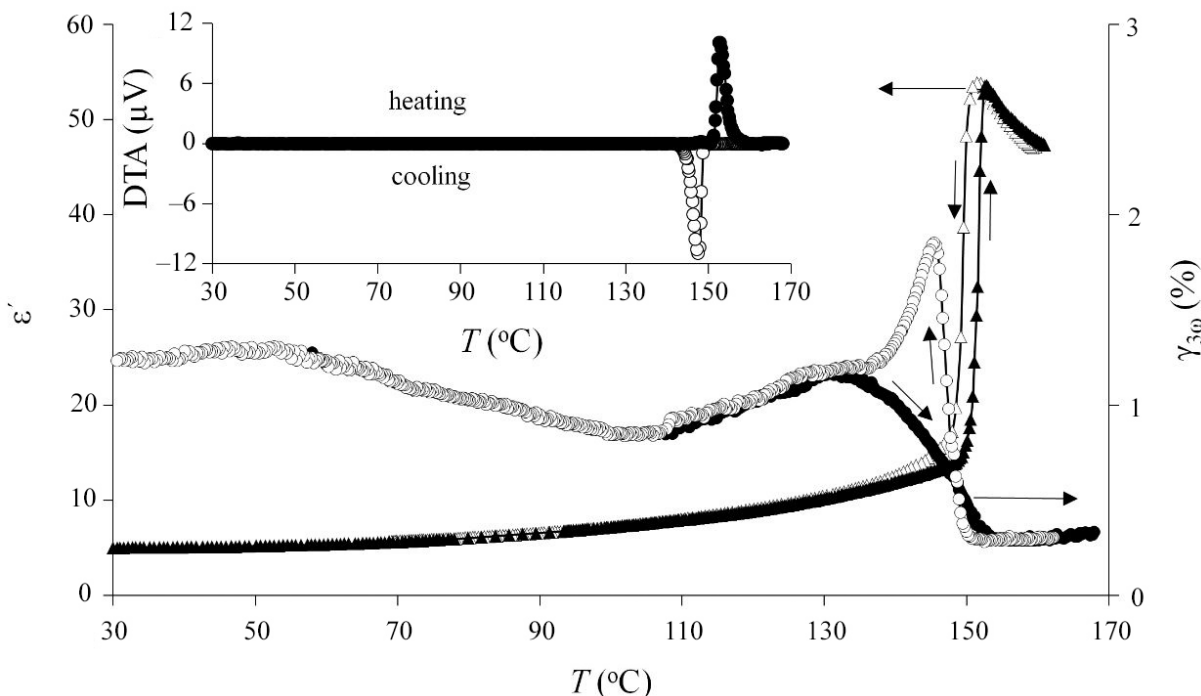


Рис. 2. Зависимости $\epsilon'(T)$ (левая ось) и $\gamma_{3\omega}(T)$ (правая ось) для DIPAB.
 На вставке – зависимость сигнала ДТА от температуры для DIPAB
 Fig. 2. Dependences $\epsilon'(T)$ (left axis) and $\gamma_{3\omega}(T)$ (right axis) for DIPAB.
 The inset shows the dependence of the DTA signal on temperature for DIPAB

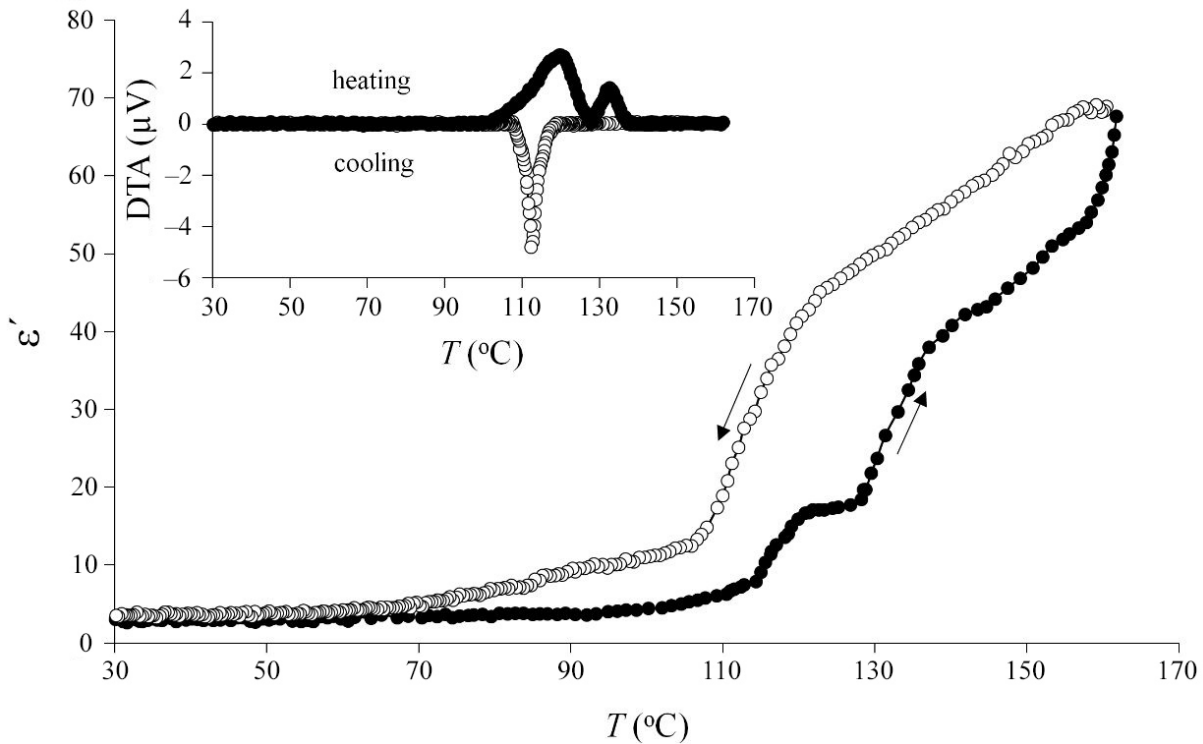


Рис. 3. Зависимости $\epsilon'(T)$ (левая ось) для $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$.
 На вставке – зависимость сигнала ДТА от температуры для $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$
 Fig. 3. Dependences $\epsilon'(T)$ (left axis) for $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$.
 The inset shows the dependence of the DTA signal on temperature for $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$

янием он смещается в область более высоких температур ($\sim 133^\circ\text{C}$). По результатам эксперимента фиксируется расщепление фазового перехода. Подобное ранее наблюдалось для композитов на основе иодида диизопропиламмония $(\text{DIPAI})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ [10].

Следует отметить, что температурная зависимость коэффициента третьей гармоники $\gamma_{3\omega}$ для композитных образцов $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ в настоящей работе не исследовалась. Это связано с тем, что присутствие металлических частиц меди приводит к существенному росту проводимости и диэлектрических потерь, особенно вблизи сегнетоэлектрических фазовых переходов. В таких условиях измеряемый сигнал третьей гармоники формируется не только за счёт нелинейной поляризации сегнетоэлектрической матрицы, но и вследствие токовой нелинейности. Это приводит к смешанному характеру нелинейного отклика и делает невозможной однозначную интерпретацию коэффициента $\gamma_{3\omega}$. Кроме того, выявленная микроскопическая неоднородность композита и наличие областей DIPAB с различным локальным окружением и, как следствие, различными температурами фазового перехода,

приводят к наложению вкладов от нескольких подсистем. В результате температурная зависимость $\gamma_{3\omega}$ для композита не может быть корректно соотнесена с каким-либо одним фазовым переходом.

Для объяснения наблюдаемых эффектов целесообразно обратиться к феноменологической теории Ландау–Гинзбурга сегнетоэлектрических фазовых переходов, которая описывает критическое поведение вблизи температуры фазового перехода T_0 за счёт разложения свободной энергии по параметру порядка [15–19]. В качестве параметра порядка в сегнетоэлектриках выступает поляризация P и определяемая поляризацией плотность свободной энергии, с учетом поверхностной составляющей F_s , представляется в виде:

$$F = \frac{\alpha_0}{2}(T - T_0)P^2 + \frac{\beta}{4}P^4 + \frac{\gamma}{6}P^6 + \frac{k}{4}(\text{grad}P)^2 + F_s, \quad (2)$$

где α_0 , β , γ , k – коэффициенты разложения Ландау, $(\text{grad}P)^2$ – член, учитывающий вклад неоднородности поляризации.

В композитных системах с металлическими частицами существенный вклад в свободную



энергию вносит взаимодействие поляризации сегнетоэлектрических частиц с экранирующими электрическими полями на межфазных границах. Металлические частицы эффективно компенсируют деполяризующие поля, однако одновременно приводят к изменению граничных условий для поляризации и к перераспределению локальных электрических полей. В рамках теории Ландау–Гинзбурга это эквивалентно появлению дополнительного поверхностного вклада в свободную энергию, который может быть записан как [15–19]

$$F_S = \int_S \frac{\sigma}{2} P^2 dS, \quad (3)$$

где S – суммарная площадь межфазных границ для единицы объема, σ – коэффициент, зависящий от экранирования и граничных условий. С учетом этого вклада эффективная температура T_c сегнетоэлектрического фазового перехода принимает вид [20]:

$$T_c = T_0 - \frac{\sigma}{\alpha} \frac{s}{V}, \quad (4)$$

где s и V – площадь и объем частицы соответственно.

В композитной системе формируются области сегнетоэлектрической матрицы, характеризующиеся различными значениями отношения S/V . Для частиц, удаленных от металлических частиц, вклад поверхностной энергии мал, и фазовый переход происходит при более высокой температуре. Понижение фазового перехода может быть обусловлено диполь-дипольным взаимодействием контактирующих и не контактирующих с Cu частиц DIPAB [21]. Напротив, в частицах DIPAB, контактирующих с частицами меди, эффективная температура Кюри существенно понижена. В результате макроскопический фазовый переход проявляется в форме двух последовательно реализующихся переходов, соответствующих различным подсистемам внутри композита.

Для оценки доли частиц DIPAB, находящихся в непосредственном контакте с частицами Cu , использовалась геометрическая модель случайного пространственного распределения сферических частиц. Предполагалось, что частицы являются жесткими, недеформируемыми и равномерно распределенными в объеме без агломерации. Средний размер используемых в работе частиц DIPAB составлял 2 мкм, а частиц Cu – 1 мкм. Контакт считался реализованным при геометрическом касании частиц. Для массы порошка меди

m с радиусом частиц r (в предположении того, что частицы меди имеют сферическую форму) площадь межфазных границ оценивалась по формуле (см. [22]):

$$S = 3m/r\rho,$$

где ρ – плотность меди. В нашем случае доля частиц Cu , находящихся в контакте с DIPAB, составила 69%, а доля частиц Cu , не находящихся в контакте с DIPAB, – 31%. Эти результаты согласуются с результатами ДТА для композита $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ (см. вставку на рис. 3), согласно которым при низкотемпературном фазовом переходе наблюдается большая интенсивность сигнала ДТА в сравнении с высокотемпературным.

Таким образом, наблюдаемое снижение температуры сегнетоэлектрического фазового перехода и его расщепление в композитах $(\text{DIPAB})_{0.98}/(\text{Cu})_{0.02}$ находятся в согласии с феноменологической теорией Ландау–Гинзбурга с учетом поверхностных эффектов. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что металлические частицы меди выступают в роли эффективного фактора, модифицирующего термодинамический потенциал сегнетоэлектрической матрицы.

Заключение

Таким образом, в отличие от чистого DIPAB, для которого характерен один сегнетоэлектрический фазовый переход при 153°C, в композите наблюдается расщепление перехода на два. Предполагается, что данный эффект обусловлен микроскопической неоднородностью системы и различными граничными условиями поляризации в областях DIPAB, контактирующих и не контактирующих с металлическими частицами. В рамках феноменологического подхода Ландау–Гинзбурга результаты объясняются вкладом межфазной поверхности в свободную энергию и изменением локальных электрических полей.

Список литературы / References

1. Lukacs V. A., Padurariu L., Ciomaga C. E., Gheorghiu F., Horchidan N., Giuranno D. Emergent electrical properties in metal-ceramic composites: A critical review. *Ceramics International*, 2025, vol. 51, iss. 25, pp. 43459–43487. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.137>
2. Buttlar T., Leipnerb H. S., Ebbinghaus S. G. Magnetoelectric properties of bulk 0-3 Fe/BaTiO₃-composites. *RSC Adv.*, 2025, vol. 15, pp. 33480–33493. <https://doi.org/10.1039/D5RA03466C>



3. Xu N., Pu Y., Wang B., Wu H., Chen K. Enhanced mechanical and dielectric behavior of BaTiO₃/Cu composites. *Ceramics International*, 2012, vol. 38, iss. 1, pp. 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.06.048>
4. Sánchez-Jiménez P. E., Pérez-Maqueda L. A., Diánez M. J., Perejón A., Criado J. M. Mechanochemical preparation of BaTiO₃-Ni nanocomposites with high dielectric constant. *Composite Structures*, 2010, vol. 92, iss. 9, pp. 2236–2240. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.011>
5. Udalov O. G., Chtchelkatchev N. M., Glatz A., Beloborodov I. S. Interplay of Coulomb blockade and ferroelectricity in nanosized granular materials. *Phys. Rev. B*, 2014, vol. 89, art. 054203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.054203>
6. Thirimal C., Biswas P. P., Shin Y. J., Noh T. W., Giridharan N. V., Venimadhav A., Murugavel P. Study of ferroelectric characteristics of diisopropylammonium bromide films. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 120, iss. 12, art. 124107. <https://doi.org/10.1063/1.4963754>
7. Khatun M., Kabir E. Dielectric relaxation and electrical conductivity in lead-free organic ferroelectric diisopropylammonium bromide (dipaBr). *Solid State Communications*, 2024, vol. 393, art. 115670. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2024.115670>
8. Deswal S., Arab S., He N., Gao W., Lee B., Misra V. Triboelectric nanogenerator based on electrospun molecular ferroelectric composite nanofibers for energy harvesting. *RSC Applied Polymers*, 2024, vol. 2, iss. 4, pp. 634–641. <https://doi.org/10.1039/d4lp00024b>
9. Yang W., Li H., Lin J., Chen G., Wang Y., Wang L., Lu H., Chen L., Lei Q. A novel all-organic DIPAB/PVDF composite film with high dielectric permittivity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, vol. 28, pp. 9658–9666. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6716-x>
10. Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V., Stukova E. V. Dielectric and thermal properties of composites based on diisopropylammonium iodide and copper microparticles. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2025, vol. 68, no. 7, pp. 50–56 (in Russian). <https://doi.org/10.17223/00213411/68/7/7>
11. Baryshnikov S. V., Milinskii A. Y., Egorova I. V., Charnaya E. V. Size Effect in Nanocomposites Based on Molecular Ferroelectric Diisopropylammonium Bromide. *Physics of the Solid State*, 2019, vol. 61, iss. 2, pp. 134–138. <https://doi.org/10.1134/S1063783419020057>
12. Milinskii A., Baryshnikov S., Parfenov V., Kozlola S., Thuong N. H. Nonlinear dielectric response of nanocomposites based on potassium dihydrogen phosphate. *Trans. Electr. Electron. Mater.*, 2018, vol. 19, pp. 201–205. <https://doi.org/10.1007/s42341-018-0032-x>
13. Baryshnikov S. V., Milinskii A. Y., Antonov A. A., Charnaya E. V., Bugaev A. S. Phase transitions in the (BaTiO₃)_x/(BiFeO₃)_{1-x} composite ceramics: Dielectric studies. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.037>
14. Ribeiro V. F., Cardoso J. E., Simões D. N., Pittol M., Tomacheski D., Santana R. M. C. Use of copper microparticles in SEBS/PP compounds. Pt. 1: Effects on morphology, thermal, physical, mechanical and antibacterial properties. *Mat. Res.*, 2019, vol. 22 (2), art. e20180304. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0304>
15. Bystrov V. S., Fridkin V. M. Two-dimensional ferroelectrics and homogeneous switching. On the 75th anniversary of the Landau – Ginzburg theory of ferroelectricity. *Phys. Usp.*, 2020, vol. 63, pp. 1140–1147. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.09.038841>
16. Segatto M., Lizzit, D., Esseni, D. An LGD model with extrinsic nucleations for polarization dynamics in ferroelectric materials and devices. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, art. 19619. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03469-8>
17. Ginzburg V. L., Levanyuk A. P., Sobyenin A. A. Comments on the region of applicability of the Landau theory for structural phase transitions. *Ferroelectrics*, 1987, vol. 73, pp. 171–182. <https://doi.org/10.1080/00150198708227916>
18. Levanyuk A. P., Misirlioglu I. B., Okatan M. B. Landau, Ginzburg, Devonshire and others. *Ferroelectrics*, 2020, vol. 569, iss. 1, pp. 310–323. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1822684>
19. Ginzburg V. L. Phase transitions in ferroelectrics: Some historical remarks. *Ferroelectrics*, 2002, vol. 267, pp. 23–32, <https://doi.org/10.1080/00150190210992>
20. Zhong W. L., Wang Y. G., Zhang P. L., Qu B. D. Phenomenological study of the size effect on phase transitions in ferroelectric particles. *Phys. Rev. B*, 1994, vol. 50, pp. 698–703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.698>
21. Uskov A. V., Charnaya E. V., Pirozerskii A. L., Bugaev A. S. The transverse Ising model of the ferroelectric phase transition in a system of coupled small particles. *Ferroelectrics*, 2015, vol. 482, pp. 70–81. <https://doi.org/10.1080/00150193.2015.1056708>
22. Stoyan D., Cepuritis R. Estimation of the specific surface area of particle samples. *Metrika*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s00184-026-01021-w>

Поступила в редакцию 25.02.2026; одобрена после рецензирования 23.03.2026; принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 25.02.2026; approved after reviewing 23.03.2026; accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМАТЕРИАЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 225–232
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 225–232
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-225-232>, EDN: XHJCGF

Научная статья
УДК 534.08

Акустоэмиссионный метод анализа структурной эволюции пеноподобных сред

Е. А. Исаева[✉], А. А. Исаева, М. В. Алонова

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

Исаева Елена Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», 27isaevaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>, AuthorID: 631180

Исаева Анна Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», isanna.1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>, AuthorID: 732490

Алонова Марина Васильевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», alonova_marina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7772-3985>, AuthorID: 667431

Аннотация. В метастабильных газожидкостных пенах в процессе их эволюции происходят структурные перестройки в условиях локального массопереноса жидкой и газовой компонент системы. События перегруппировки и коалесценций газовых пузырей могут быть единичными или каскадными за счет разрушения пленок соседних газовых пузырей. Подобные структурные изменения архитектуры пены будут отражены на её акустическом эмиссионном спектре. Структурная модификация газожидкостных пен в условиях постоянного соотношения объемных долей жидкости и газа регулируется капиллярными силами, толщиной пленки и площадью жидких пленок пены. В данной работе рассмотрено типичное поведение спектра акустической эмиссии газожидкостной пены в области малых частот при универсальной степенной зависимости среднего радиуса газовой ячейки от времени.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, газожидкостная пена, автомодельность, скаффолды

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00679, <https://rscf.ru/project/25-29-00679/>).

Для цитирования: Исаева Е. А., Исаева А. А., Алонова М. В. Акустоэмиссионный метод анализа структурной эволюции пеноподобных сред // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 225–232. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-225-232>, EDN: XHJCGF

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

Article

Acoustic emission method for analyzing the structural evolution of foam-like media

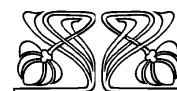
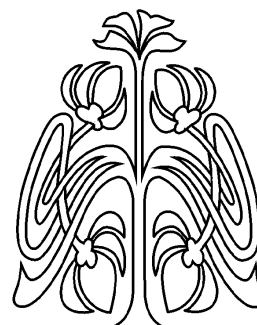
Е. А. Isaeva[✉], А. А. Isaeva, М. V. Alonova

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

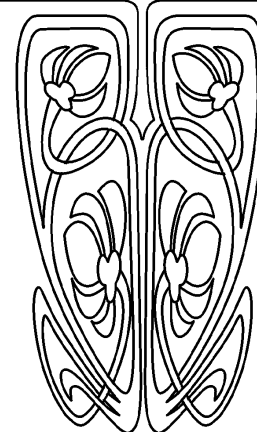
Elena A. Isaeva, 27isaevaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>, AuthorID: 631180

Anna A. Isaeva, isanna.1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>, AuthorID: 732490

Marina V. Alonova, alonova_marina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7772-3985>, AuthorID: 667431



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





Abstract. Background and Objectives: In metastable gas-liquid foams, structural rearrangement occurs during their evolution under conditions of local mass transfer of the liquid and gas components of the system. Rearrangement and coalescence events of gas bubbles will be reflected in the foam's acoustic emission spectrum. Structural modification of gas-liquid foams under conditions of constant volume fractions of liquid and gas is governed by capillary forces, film thickness, and the area of the foam's liquid films. This work examines the typical behavior of the acoustic emission spectrum of a gas-liquid foam in the low-frequency region, considering the scaling dependence of the average gas cell radius on time.

Materials and Methods: The acoustic emission spectrum of a model gas-liquid foam was studied during its evolution in the low-frequency range. Using microscopy methods, the temporal dependencies of changes in the average foam gas cell size were obtained. **Results:** The time dependence of the average size of gas cells in a model gas-liquid foam exhibits a characteristic power-law dependence on time with an exponent of 0.5. The recorded acoustic signal is generated by a set of coalescence and rearrangement events of gas cells within the medium and, during foam evolution, will be described by a characteristic spatial scale proportional to the average bubble size $\langle R(t) \rangle$. **Conclusion:** The possibility of using acoustic emission signal analysis to study the structural modifications in a metastable two-component system during its evolution under self-similarity conditions has been demonstrated. It has been shown that the scaling laws governing the evolution of the gas-liquid foam's emission spectra and the dependence of the average gas cell radius reflect the dynamic self-similarity. The comparison of critical exponents allows us to analyze the kinetics of local inhomogeneity changes and the morphological evolution of the two-component system.

Keywords: acoustic emission, gas-liquid foam, self-similarity, scaffolds

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-29-00679, <https://rscf.ru/project/25-29-00679/>).

For citation: Isaeva E. A., Isaeva A. A., Alonova M. V. Acoustic emission method for analyzing the structural evolution of foam-like media. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 225–232 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-225-232>, EDN: XHJCGF

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

Введение

Метод акустической эмиссии имеет большой потенциал как метод оценки структурной модификации двухфазных сред в условиях локального массопереноса компонент системы.

Методы диагностики структурной модификации пеноподобных систем играют важную роль в задачах биомедицины. Так, пористые 3D структуры, в том числе скаффолды, активно внедряющиеся в регенеративной медицине, могут быть использованы для доставки биохимических факторов, лекарств, жизненно важных питательных веществ, оказания механического и биологического воздействия на поведение клеток [1, 2]. Контроль структурных параметров каркасов в режиме реального времени и управление их эволюцией в процессе синтеза позволит повысить функциональность скаффолдов [3–6].

К существующим методам анализа структурных и функциональных свойств неравновесных объемных пен в процессе эволюции в режиме реального времени можно отнести методы диффузионно-волновой спектроскопии (ДВС), активно развивающиеся применительно к анализу структурных эволюций подобных нестационарных двухкомпонентных пен. С использованием методов ДВС показано, что ключевыми параметрами в эволюции газожидкостных пен являются объемная доля жидкости и средний размер газовых пузырьков пены [7–9]. Методом томографии выявлены универсальные законы изменения распределения газовых ячеек в газожидкостной пене по размерам с течением времени [10]. Однако такой подход требует

особой подготовки образцов и не подходит для реализации диагностики структуры объемных пеноподобных сред в режиме реального времени.

Метод пассивного акустического мониторинга в условиях улучшения механизмов сбора и распознавания звуков становится перспективным для мониторинга состояния процессов образования и схлопывания газовых пузырьков [11].

Газожидкостные пены относятся к модельным системам изучения локального массопереноса и динамики структурных реконфигураций неупорядоченных ячеистых систем. Эволюция метастабильных систем сопровождается медленным постепенным ростом размера газовой ячейки в результате локального перераспределения газовой составляющей и быстрыми событиями перестройки (коалесценциями) в результате разрыва жидкой пленки и локального перераспределения жидкой компоненты системы. В процессе таких структурных перестроек формируется акустический эмиссионный сигнал, параметры и взаимодействие которого со структурными элементами системы определяются морфологическими особенностями развития системы. Эмиссионный сигнал представляет собой широкополосный спектр с возможными ярковыраженными модами на определенных частотах.

Наиболее часто в работах рассматривают моды колебаний единичных газовых пузырей в жидкости, описываемые частотами Миннаерта [12–14]. Значение частоты Миннаерта для газового пузырька в жидкости зависит от его размеров и гидродинамики. Для пузырька радиусом



от 30 нм до 300 мкм в несжимаемой жидкости частота Миннаерта варьируется примерно от 100 МГц до 10 кГц [15]. Для коммерческой пены Gillette критический радиус, определяющий резкий скачок в скорости распространения акустических волн, соответствует значению порядка 72 мкм и частоте Миннаерта порядка 40 кГц. [16].

Анализ всего спектра акустической эмиссии несет информацию не только о поведении отдельных газовых пузырей, но и о развитии и структурных перестройках системы в целом. Именно анализу единичных газовых пузырей в жидкости, в частности, в области собственной резонансной частоты пузыря, посвящено много работ. Так, было получено соотношение между распределением энергии спектра эмиссии и формой разрывающегося на поверхности неньютоновской жидкости единичного газового пузыря [17]. Проведен анализ энергий деформаций при коалесценции единичных пузырей и лавинных коалесценциях в газожидкостных пенах [18].

Акустический эмиссионный подход применим и для анализа случайно-неоднородных сред с нестационарной структурой [19]. Взаимосвязь формы и размеров структурных элементов пены на разных этапах развития системы с акустическим эмиссионным сигналом была проанализирована в работе [20].

В газожидкостных пенах спектр акустической эмиссии лежит в широком диапазоне частот, что говорит о одновременных каскадных коалесценциях пузырей в пене. В работе [21] показано, что интенсивность и статистика событий перестройки и коалесценции связаны с акустическим сигналом, и акустическая эмиссия позволяет отслеживать кинетику разрушения пенной структуры. Для эмиссионного сигнала газожидкостных пен обычно выделяют интервалы, связанные с особенностями структурных перестроек. Энергетические компоненты, регистрируемые в частотном интервале в области высоких частот 10–50 кГц, связывают с резонансами коллапсирующих газовых пузырей и их коллективными колебаниями [22]. Формирование акустического сигнала в области низких частот ассоциируются со структурными перестройками в пене и характерным «потрескиванием» пенной структуры. [23].

Кинетика развития локальных нестабильностей (коалесценций) и оствальдовского созревания газожидкостной пены зависит от объемных

долей компонент системы, взаимного распределения компонент в пространстве и их геометрических параметров [24]. Геометрический размер газового включения в случайно-неоднородной среде, характеризующейся монодисперсным распределением газовых ячеек внутри жидкого каркаса, в отсутствии синерезиса в текущий момент времени определяется только объемной долей жидкой составляющей. Кинетика развития архитектуры таких систем сопровождается перестройками, обусловленными постепенным ростом радиуса газового пузыря внутри ячейки. В пеноподобных полидисперсных системах между составными элементами жидкого каркаса – пленками и каналами и призмами Плато – Гиббса – могут развиваться эффекты изменения соотношения их объемных долей. Критическая толщина жидкой пленки влияет на характер коалесценции и локальность захватываемого коалесценцией объема газовых ячеек. Для квазидвумерных газожидкостных пен показано, что вторичная индуцированная коалесценция газовых пузырей зависит от объемной доли жидкости, и при её уменьшении наблюдается уменьшение количества захваченных в процесс коалесценции пузырей [25]. Переход от «сухой» к «влажной» пене в процессе развития системы может оказывать влияние на капиллярные давления и доли жидкостей в пленках, каналах и призмах Плато – Гиббса и также влиять на регистрируемые сигналы [26]. Запас жидкой компоненты в рассеивающем каркасе определяет массы мелких капель от разрыва первой пленки, разлетающихся при коалесценции и индуцирующих разрыв соседних пленок [27]. Для газовых пузырьков в жидкости продемонстрировано, что лавинная коалесценция зависит от длины и кривизны тонких жидких пленок [28]. Процесс синерезиса жидкости также оказывает влияние на формирование коалесценций, и при дренаже жидкости пленки большой длины истончаются локально, а пленки малой длины истончаются по всей длине [29]. Альтернативным критическим параметром помимо толщины пленки и объемной доли жидкости можно рассмотреть площадь поверхности жидкой пленки. Так, показано, что в пенах в случае определенного капиллярного давления вероятность коалесценций определяется площадью пленки, разделяющей два пузыря [30].

Таким образом, в процессе эволюции газожидкостной пены при неизменной объемной



доле жидкой компоненты её структурные модификации регулируются толщинами жидких пленок между газовыми ячейками и радиусами каналов Плато – Гиббса и газовых ячеек. При этом механизмы регуляции и соотношение вкладов коалесценций в результате остальдовского роста пузырей, тепловых и капиллярных волн могут меняться в процессе развития системы. Показано, что в процессе эволюции газожидкостные пены переходят в автомоделный режим, и ряд параметров таких систем описываются степенным законом, имеющим универсальный характер [31, 32]. В таких системах при малой объемной доле жидкости средняя длина пленки линейно росла во времени, а соответствующие распределения таких длин были фактически стационарными при развитии пены в условиях коалесценции газовых ячеек [33]. В самоподобном режиме взаимосвязь средних размеров ячейки и временных масштабов между актами перестройки и плотностью вероятности событий перестройки газовых пузырей может подчиняться степенному закону, имеющему универсальный характер [34, 35].

Сигнал акустической эмиссии пены содержит информацию о структурных эволюциях и скоростях локального массопереноса компонент системы в процессе развития таких систем. В данной работе рассмотрена возможность использования параметров эмиссионного спектра газожидкостной пены для диагностики структурных модификаций в процессе эволюции её архитектуры в автомоделном режиме в области малых частот.

Методы и результаты

Условная схема измерительной ячейки экспериментальной установки, представленная на рис. 1, состояла из шумомера-анализатора «Экофизика 110» с микрофоном МК-265 (50 мВ/Па, частотный диапазон 1.6–20000Гц, Октава-Электрон Дизайн, Россия) и с предусилителем P200 (Октава-Электрон Дизайн, Россия), кюветы с образцом модельной газожидкостной пены (кювета имела отверстие, позволяющие незначительно погружать в нее покрытый пленкой предусилитель с микрофонным капсулем) и шумоизоляционного короба позволяющего значительно убрать шумы в регистрируемом сигнале.

Шумомер-анализатор «Экофизика 110» соединялся с персональным компьютером (ПК). В процессе измерения акустической эмиссии

прибор шумомер-анализатора целиком вместе с кюветой с модельной средой размещался внутри шумоизоляционного короба. Преобразованный шумомер-анализатором сигнал передавался на ПК и обрабатывался с помощью приложения Audacity. В приложении Audacity с использованием встроенных функций преобразования Фурье (частота дискретизации 96 кГц) получали частотные зависимости амплитуды регистрируемого сигнала. Сигнал фонового шума измеряли путем помещения шумомера-анализатора в шумоизоляционный короб в закрытом состоянии без модельной среды. Полученные частотные зависимости амплитуды сигнала акустической эмиссии анализировались во всем частотном диапазоне с учетом уровня шумов. Регистрируемый сигнал переменного выходного напряжения с микрофона записывался на протяжении всего эксперимента.

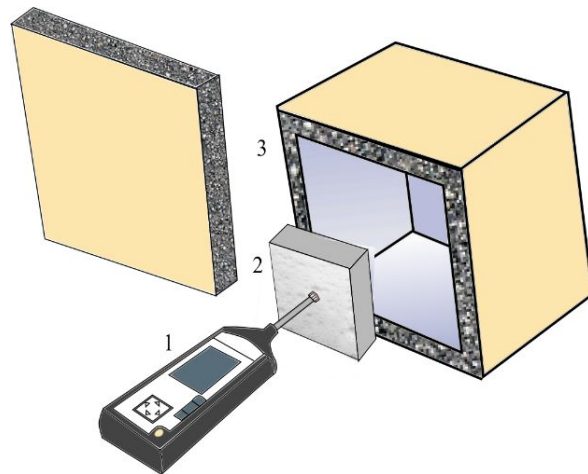


Рис. 1. Условная схема измерительной ячейки экспериментальной установки: 1 – шумомер-анализатор «Экофизика 110» с микрофоном МК-265 и предусилителем P200, 2 – кювета с образцом модельной газожидкостной пены, 3 – шумоизоляционный короб (цвет онлайн)

Fig. 1. The schematic of the experimental measurement cell: 1 – the Ekofizika 110 sound level analyzer equipped with an MK-265 microphone (sensitivity 50 mV/Pa, frequency range 1.6–20000 Hz) and a P200 preamplifier, 2 – the sample cuvette containing the model gas-liquid foam, 3 – the acoustic isolation box (color online)

В качестве модельной среды использовалась газожидкостная пена (крем для бритья Gillette Foamy Regular), которая размещалась в кювете размером 15 x15 мм и имела толщину 6 мм. До эксперимента производились временное закрытие кюветы и ее взвешивание на лабораторных весах (модель: DL-123, производитель – ДЭМКОМ, Россия, Москва) с погрешностью не хуже 0.01 г. (Взвешивание



осуществлялось также и после проведения эксперимента).

После первоначального взвешивания кювета с пеной аккуратно размещалась на дне шумоизоляционного короба; часть поверхности кюветы приоткрывалась для размещения кончика зонда шумомер-анализатора и затем аккуратно запечатывалась липкой пленкой в области контакта зонда шумомера-анализатора и кюветы. В процессе выполнения эксперимента температура окружающей среды была равна 24° С. В процессе старения пены объемная доля жидкой составляющей пены была порядка $\epsilon \approx 0.7$. Кювета располагалась горизонтально; считалось, что до 500 мин влиянием синерезиса на развитие архитектуры можно пренебречь. Для контроля изменения среднего размера газовых пузырей модельных сред проводились оценки геометрических параметров с помощью микроскопической системы с КМОП-камерой (микроскопические объективы Nikon MRP70100 и Nikon MRP70040, камера Thorlabs DCC 1240C-HQ, Thorlabs, Inc., США). Временная зависимость средних (по кювете) значений радиусов сфер $\langle R \rangle(t)$, приравненных к геометрическим размерам газовых ячеек газожидкостной пены, в процессе эволюции системы представлены на рис. 2.

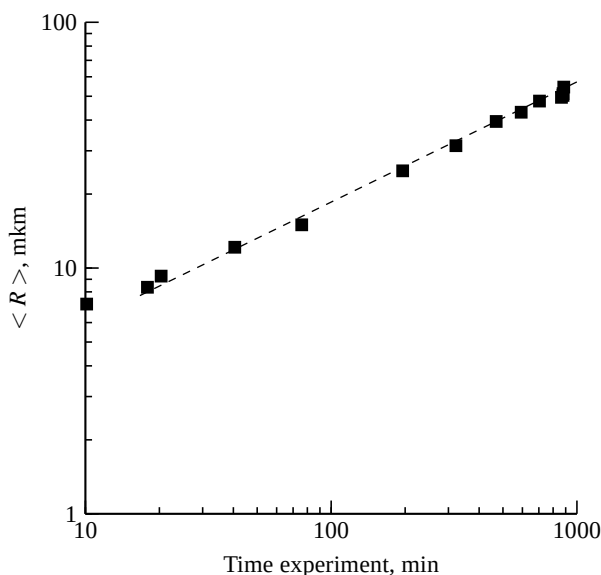


Рис. 2. Временная зависимость средних значений радиусов сфер $\langle R \rangle(t)$, Пунктирная линия – аппроксимация степенным законом с показателем 0.5

Fig. 2. Temporal dependence of the mean radii of spheres $\langle R \rangle(t)$ equivalent to the geometric sizes of gas cells in a gas-liquid foam during system evolution. The dashed line represents a power-law approximation with an exponent of 0.5

Спектральные зависимости сигнала акустической эмиссии модельной системы для разных моментов времени в процессе эволюции пены представлены на рис. 3.

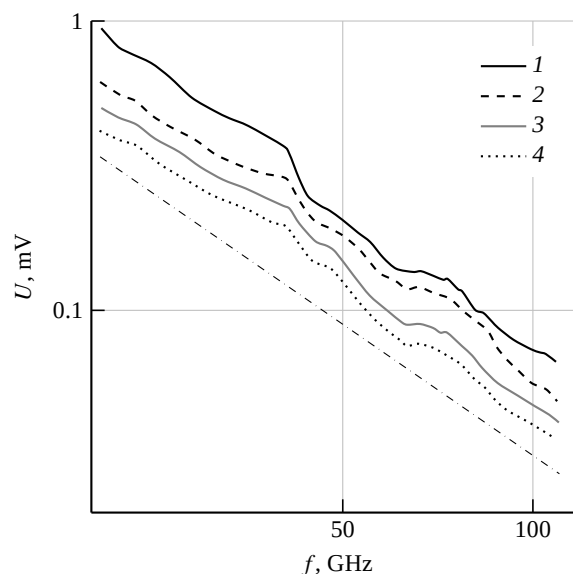


Рис. 3. Регистрируемый сигнал выходного напряжения микрофона для акустической эмиссии газожидкостной пены в процессе эволюции системы с учетом фонового шума в разные моменты времени после начала развития системы: 1 – 60, 2 – 80, 3 – 180, 4 – 215 мин. Пунктирная прямая линия – аппроксимация степенным законом с показателем -1.5

Fig. 3. The recorded microphone output voltage signal for the acoustic emission of a gas-liquid foam during system evolution taking into account background noise at the different time points after the beginning of foam evolution: 1 – 60, 2 – 80, 3 – 180, 4 – 215 min. The straight dashed line represents a power-law approximation with an exponent of -1.5

Обсуждение результатов

По результатам микроскопии в процессе развития системы оценивались изменения среднего размера газовых ячеек. Анализ показал, что временная зависимость средних значений радиусов сфер $\langle R \rangle$ от времени может быть аппроксимирована типичным соотношением описания динамики систем в режиме самоподобия как $\langle R \rangle(t) \propto t^{0.5}$.

Для самоподобных систем изменение распределения радиусов газовых ячеек с течением времени будет описываться характерным критическим радиусом и некоторой постоянной величиной дисперсии распределения пузырей по размерам σ . В таком режиме геометрические параметры структурных элементов (в частности толщина и площадь поверхности жидких пленок) в условиях неизменной объемной доли жидкости и газа также являются зависимыми



от среднего радиуса газовой ячейки, что описывается балансом капиллярных сил и вязкости.

Для подобных систем можно предположить, что акустический сигнал генерируется некоторыми событиями (коалесценции и перестроек внутри структуры за счет разрыва пленок) с характерным пространственным масштабом, пропорциональным $\langle R \rangle(t)$. В режиме автомодельности в разные моменты времени спектр акустической эмиссии должен иметь типичную частоту и некоторую амплитуду, которая будет отражать форму спектра.

В развитии газожидкостных пен ключевую роль играет остwaldское созревание пены. Для таких систем существует критический радиус газовых пузырей. Газовые ячейки с радиусом меньшим критического значения постепенно исчезают (за счет диффузии газа) в пузыри большего размера. При схлопывании единичного пузыря возникает локальный дисбаланс равновесия системы, и в этой области может запуститься процесс вторично развивающихся после первого события коалесценций соседних пузырей. Поверхностная энергия, освобождаемая при разрушении пленки при схлопывании пузыря, зависит от радиуса схлопнувшегося пузыря. Чем больше радиус исчезнувшего пузыря, тем большая поверхностная энергия высвобождается в области локального дисбаланса и увеличивается вероятность большего количества каскадных событий разрыва и роста размеров области локального дисбаланса. И можно предположить, что характерное время релаксации для событий структурных перестроек в условиях неизменной вязкости жидкой составляющей системы подчиняется соотношению $\langle t \rangle \propto \langle R(t) \rangle$, и спектр сигнала при этом описывается степенным законом, имеющим универсальный характер. Характерная частота акустической эмиссии f_c в данный момент времени $f_c(t) \propto \frac{1}{t} \propto \frac{1}{\langle R(t) \rangle} \propto t^{-0.5}$. В общем виде для процессов с масштабной инвариантностью:

$$G(t, f) = A(t) \cdot F(f/f_c), \quad (1)$$

где $G(t, f)$ – рассматриваемый сигнал, $A(t)$ – функция изменения амплитуды сигнала в данный момент времени, $F(f/f_c)$ – функция подобия.

Для наших экспериментальных данных на некоторой выделенной частоте f_0 , можем наблюдать степенной закон спада амплитуды сигнала акустической эмиссии как $G(t, f_0) \propto t^{-0.5} \propto R^{-1}$. Спектральный закон по полученным экспериментальным данным спектральной мощности

акустической эмиссии в каждый момент времени падает с частотой как $G(t, f) \propto f^{-1.5}$. Таким образом, спектр эмиссионного сигнала подчиняется единому универсальному закону:

$$G(t, f) = R(t)^{0.5} \cdot F(f \cdot R(t)). \quad (2)$$

Подобный результат универсального поведения сигнала акустической эмиссии может быть получен посредством изменения числа рассеивателей в системе, что также должно давать типичное поведение параметров системы в процессе её развития, описываемое универсальными степенными законами. Полученные результаты описания универсальными степенными уравнениями сигнала акустической эмиссии газожидкостной пены согласуются со степенными зависимостями для параметров коалесценции и геометрических параметров подобных систем, приведенные, например, в работах [32, 33]. Таким образом, акустический эмиссионный сигнал может быть рассмотрен как фундаментальная основа для развития подхода диагностики динамики структурной модификации нестационарных пеноподобных дисперсных систем.

Заключение

Продемонстрировано, что диагностировать поведение структурных изменений в метастабильной двухкомпонентной пене в процессе её эволюции в условиях режима автомодельности системы можно с помощью анализа спектра акустической эмиссии. Показано, что закономерности изменения спектров эмиссионного сигнала газожидкостной пены, как и зависимость среднего радиуса газовой ячейки, подчиняются условиям автомодельности, и сопоставление критических параметров позволяет анализировать кинетику изменения локальных неоднородностей и изменения морфологии двухкомпонентной системы. Метод акустической эмиссии может быть использован для анализа стабильности и архитектуры развития двухфазных нестационарных сред в режиме реального времени, что играет важную роль для биомедицины, в частности для анализа морфофункциональных свойств тканеинженерных конструкций в процессе их синтеза.

Список литературы / References

1. Maksoud F. J., de la Paz M. F. V., Hann A. J., Thanarak J., Gwendolen C Reilly G. C., Claeysens F., Green N. H., Zhang Yu S. Porous biomaterials for tissue engineering: A review. *J. Mater. Chem. B*, 2022, vol. 10, iss. 40, pp. 8111–8165. <https://doi.org/10.1039/d1tb02628c>



2. Sultana N., Cole A., Strachan F. Biocomposite scaffolds for tissue engineering: Materials, fabrication techniques and future directions. *Materials (Basel)*, 2024, vol. 17, no. 22, art. 5577. <https://doi.org/10.3390/ma17225577>
3. Lutzweiler G., Halili A. N., Vrana N. E. The overview of porous, bioactive scaffolds as instructive biomaterials for tissue regeneration and their clinical translation. *Pharmaceutics*, 2020, vol. 12, no. 7, art. 602. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12070602>
4. Murphy C. M., Haugh M. G., O'Brien F. J. The effect of mean pore size on cell attachment, proliferation and migration in collagen–glycosaminoglycan scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 2010, vol. 31, iss. 3, pp. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.09.063>
5. Loh Q. L., Choong C. Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: Role of porosity and pore size. *Tissue Eng. Part B: Reviews*, 2013, vol. 19, no. 6, pp. 485–502. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2012.0437>
6. Matsiko A., Gleeson J. P., O'Brien F. J. Scaffold mean pore size influences mesenchymal stem cell chondrogenic differentiation and matrix deposition. *Tissue Eng. Part A*, 2015, vol. 21, no. 3–4, pp. 486–497. <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2013.0545>
7. Vera M. U., Saint-Jalmes A., Durian D. J. Scattering optics of foam. *Appl. Opt.*, 2001, vol. 40, iss. 24, pp. 4210–4214. <https://doi.org/10.1364/AO.40.004210>
8. Durian D. J., Weitz D. A., Pine D. J. Multiple light-scattering probes of foam structure and dynamics. *Science*, 1991, vol. 252, iss. 5006, pp. 686–688. <https://doi.org/10.1126/science.252.5006.686>
9. Erpelding M., Guillermic R. M., Dollet B., Saint-Jalmes A., Crassous J. Investigating acoustic-induced deformations in a foam using multiple light scattering. *Phys. Rev. E*, 2010, vol. 82, art. 021409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.021409>
10. Lambert J., Mokso R., Cantat I., Cloetens P., Glazier J. A., Graner F., Delannay R. Coarsening foams robustly reach a self-similar growth regime. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, art. 248304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.248304>
11. Al-Masry W. A., Ali E. M., Aqeel Y. A. Determination of bubble characteristics in bubble columns using statistical analysis of acoustic sound measurements. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2005, vol. 83, iss. 10, pp. 1196–1207. <https://doi.org/10.1205/cherd.05014>
12. Leighton T. *The Acoustic Bubble*. London, Academic Press, 1997. 613 p.
13. Devaud M., Hocquet T., Bacri J.-C., Leroy V. The Minnaert bubble: An acoustic approach. *Eur. J. Phys.*, 2008, vol. 29, no. 6, pp. 1263–1285. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/29/6/014>
14. Minnaert M. XVI. On musical air-bubbles and the sound of running water. *Philos. Mag.*, 1933, vol. 16, iss. 104, pp. 235–248. <https://doi.org/10.1080/14786443309462277>
15. Ainslie M. A., Leighton T. G. Review of scattering and extinction cross-sections, damping factors, and resonance frequencies of a spherical gas bubble. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011, vol. 130, iss. 5, pp. 3184–3208. <https://doi.org/10.1121/1.3628324>
16. BenSalem I., Guillermic R. M., Sample C., Leroy V., Saint-Jalmes A., Dollet B. Propagation of ultrasound in aqueous foams: Bubble size dependence and resonance effects. *Soft Matter*, 2013, vol. 9, iss. 4, pp. 1194–1202. <https://doi.org/10.1039/C2SM25545F>
17. Divoux T., Vidal V., Melo F., Géminard J.-C. Acoustic emission associated with the bursting of a gas bubble at the free surface of a non-Newtonian fluid. *Phys. Rev. E*, 2008, vol. 77, art. 056310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.056310>
18. Stephens R. W. B., Pollock A. A. Waveforms and frequency spectra of acoustic emissions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1971, vol. 50, no. 3, pt. 2, pp. 904–910.
19. Chen G., Luo H., Yang H., Zhang T., Li S. Water effects on the deformation and fracture behaviors of the multi-scaled cellular fibrous bamboo. *Acta Biomater.*, 2018, vol. 65, pp. 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.10.005>
20. Vandewalle N., Lentz J. F., Dorbolo S., Brisbois F. Avalanches of popping bubbles in collapsing foams. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 86, iss. 1, pp. 179–182. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.179>
21. Marston P. L., Trinh E. H., Depew J., Asaki T. J. Response of bubbles to ultrasonic radiation pressure: Dynamics in low gravity and shape oscillations. In: Blake J. R., Boulton-Stone J. M., Thomas N. H., eds. *Bubble Dynamics and Interface Phenomena. Fluid Mechanics and Its Applications*. Dordrecht, Springer, 1994, vol. 23, pp. 343–353. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0938-3_32
22. Prosperetti A., Lezzi A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Pt. 1. First-order theory. *J. Fluid Mech.*, 1986, vol. 168, pp. 457–478. <https://doi.org/10.1017/S0022112086000460>
23. Ding J., Tsaur F. W., Lips A., Akay A. Acoustical observation of bubble oscillations induced by bubble popping. *Phys. Rev. E*, 2007, vol. 76, iss. 4, pt. 1, art. 041601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.041601>
24. Ritacco H. A. Complexity and self-organized criticality in liquid foams. A short review. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2020, vol. 285, art. 102282. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102282>
25. Furuta Y., Oikawa N., Kurita R. Close relationship between a dry–wet transition and a bubble rearrangement in two-dimensional foam. *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, art. 37506. <https://doi.org/10.1038/srep37506>
26. Yanagisawa N., Kurita R. In-situ observation of collective bubble collapse dynamics in a quasi-two-dimensional foam. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, art. 5152. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41643-x>
27. Vandewalle N., Lentz J. F. Cascades of popping bubbles along air / foam interfaces. *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 64, iss. 2, pt. 1, art. 021507. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.021507>
28. Shah M. S., Kleijn C. R., Kreutzer M. T., van Steijn V. Influence of initial film radius and film thickness on the rupture of foam films. *Phys. Rev. Fluids*, 2021, vol. 6,



- art. 013603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.013603>
29. Manev E. D., Nguyen A. V. Critical thickness of microscopic thin liquid films. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2005, vol. 114–115, pp. 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2004.07.013>
30. Forel E., Dollet B., Langevin D., Rio E. Coalescence in two-dimensional foams: A purely statistical process dependent on film area. *Phys. Rev. Lett.*, 2019, vol. 122, art. 088002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.088002>
31. Coussot P. Scaling approach of the convective drying of a porous medium. *Eur. Phys. J. B*, 2000, vol. 15, pp. 557–566. <https://doi.org/10.1007/s100510051160>
32. Zimnyakov D. A., Yuvchenko S. A., Isaeva A. A., Isaeva E. A., Tsykina D. V. Growth/collapse kinetics of the surface bubbles in fresh constrained foams: Transition to self-similar evolution. *Colloids Surf. A*, 2019, vol. 579, art. 123693. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123693>
33. Burnett G., Chae J. J., Tam W. Y., Almeida R. M. C., Tabor M. Structure and dynamics of breaking foams. *Phys. Rev. E*, 1995, vol. 51, no. 6, pp. 5788–5800. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.5788>
34. Chae J. J., Tabor M. Dynamics of foams with and without wall rupture. *Phys. Rev. E*, 1997, vol. 55, no. 1, pp. 598–611. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.598>
35. Müller W., Di Meglio J.-M. Avalanches in draining foams. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1999, vol. 11, no. 21, pp. L209–L215.

Поступила в редакцию 08.12.2025; одобрена после рецензирования 22.03.2026;
принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 08.12.2025; approved after reviewing 22.03.2026;
accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026



МЕТОДИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 233–242
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 233–242
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-233-242>, EDN: YOKUKW

Научная статья
УДК 004.89

Искусственный интеллект с позиции физика и данных LLM DeepSeek

В. М. Аникин

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

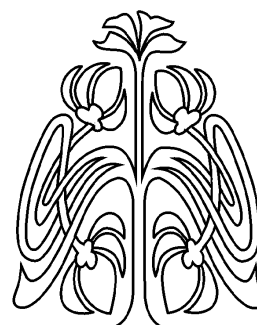
Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и электродинамики, AnikinVM@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6506-6997>, AuthorID: 166229

Аннотация. Проведен семантический, этимологический и философский анализ термина «искусственный интеллект». Показано смысловое несоответствие друг другу компонент этого термина-оксюморона, которое предложено образно выразить в форме афоризма: «*Интеллект по названию, подражатель по сути*». Термин включает в качестве составной части фундаментальное понятие «интеллект», под которым в психологии понимается совокупность способностей человека к построению репрезентаций реальности и конструированию на их основе тех или иных целевых действий. Это часто провоцирует людей некомпетентно приписывать системам «искусственного интеллекта» не свойственные им мыслительные и эмоциональные свойства, а на самом деле эти системы, основу которых составляют составленные людьми компьютерные программы, могут рассматриваться пользователями (в частности физиками) лишь как *когнитивные инструменты для их творческой деятельности*. Теоретический анализ проблематики проводился в контексте «диалогов» с большой языковой моделью DeepSeek-V.3.2, демонстрирующей логичность и смысловую связность генерируемых текстов. По содержанию сгенерированных текстов сделан вывод, что обучение этой языковой модели проходило на массиве текстов, содержание которых адекватно и аккуратно отражает функциональную роль нейросетей. В сгенерированном большой языковой моделью тексте в положительном ключе проанализированы в различных аспектах мнение о семантической некорректности термина «искусственный интеллект» и предложение о его замене в научном дискурсе на более точный по смыслу термин – «имитатор когнитивных функций человека». Отмечено, что в текстах, сгенерированных DeepSeek, воспроизводится определенный культурный паттерн «хорошего собеседника» – изложение ведется в подчеркнуто уважительном стиле, с приведением, прежде всего, аргументов и фактов, с выявлением дискуссионных мест. Конкретным внешним текстовым материалом для дискуссии послужила свежая информация из средств массовой информации, искажающая (ради псевдосенсации) сущность систем искусственного интеллекта. Отмечена целесообразность сохранения в прикладных аспектах в качестве «рабочего» термин «искусственный интеллект», имеющий 70-летнюю историю и, по сути, являющийся брендом для уточненного понятия «имитатор когнитивных функций человека». Проведенное рассмотрение термина «искусственный интеллект», основанное на рекурсивном «диалоге» с большой языковой моделью DeepSeek, сделало и ее объектом методологического осмысления.

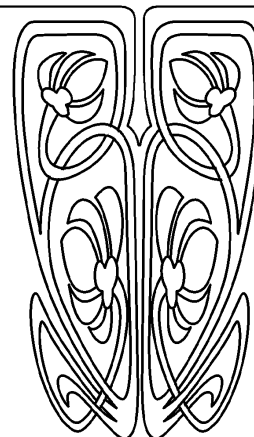
Ключевые слова: искусственный интеллект, имитация когнитивных функций человека, философия, семантика и этимология понятий, Большая языковая модель DeepSeek

Для цитирования: Аникин В. М. Искусственный интеллект с позиции физика и данных LLM DeepSeek // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 233–242. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-233-242>, EDN: YOKUKW

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



МЕТОДИЧЕСКИЙ
ОТДЕЛ





Article

Artificial Intelligence from a Physicist's Perspective and Data by LLM DeepSeek

V. M. Anikin

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

Valery M. Anikin, AnikinVM@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6506-6997>, AuthorID: 166229

Abstract. Background and Objectives. A semantic, etymological, and philosophical analysis of the term “artificial intelligence” is conducted. The semantic inconsistency between the components of this oxymoronic term is demonstrated and is proposed to be figuratively expressed in the form of an aphorism: “Intelligence by name, an imitator by nature”. The term includes as an integral part the fundamental concept of “intelligence”, which in psychology refers to the totality of human abilities to construct representations of reality and to construct target actions based on them. This often leads to the attribution (for various purposes) of mental and emotional properties to AI systems by non-specialists, although these systems, based on computer programs, can be considered merely cognitive tools. **Materials and Methods:** The theoretical analysis of the problematic was conducted in the context of “dialogues” with the DeepSeek-V.3.2 Large Language Model, which demonstrates the logic and semantic coherence of the generated texts. Based on the content of the generated texts, it was concluded that this language model was trained using a set of texts whose content adequately and accurately reflects the functional role of neural networks. **Results:** Large language model positively analyzed various aspects of the opinion regarding the inappropriateness of the term “artificial intelligence” and the proposal to replace it in scientific discourse with the more accurate term “imitator of human cognitive functions”. It is noted that the texts generated by DeepSeek reproduce a certain cultural pattern of a “good conversationalist” – the presentation is conducted in an emphatically respectful style, with the presentation of arguments and facts, and the identification of controversial areas. Specific external textual material for the discussion was recent media reports, which distorted the essence of artificial intelligence systems for the sake of false sensationalism. It is substantiated that, in the applied context, the term “AI” remains the “working” term, which has a 70-year history and essentially serves as a brand symbol for the refined concept of “imitator of human cognitive functions”. **Conclusion:** The study is based on a recursive dialogue with the DeepSeek Large Language Model, which itself becomes an object of methodological reflection.

Keywords: artificial intelligence, imitator of human cognitive functions, philosophy, semantics and etymology of concepts, DeepSeek Large Language Model

For citation: Anikin V. M. Artificial Intelligence from a Physicist's Perspective and Data by LLM DeepSeek. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 233–242 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-233-242>, EDN: YOKUKW

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

Nomine intellectus, re imitator
(Интеллект по названию, подражатель по сути)

Введение

Настоящие методические заметки – это отклик на недавнюю публикацию «Искусственный интеллект отомстил программисту за отклоненный код» в одном популярном средстве массовой информации¹. К сожалению, неверное толкование возможностей искусственного интеллекта (ИИ), порожденное терминологической и смысловой путаницей, встречается довольно часто. В данном случае мы имеем дело с печальным примером псевдосенсации, порожденной полным непониманием принципов работы ИИ. Ниже анализируются обстоятельства заблуждений, приводящих к некомпетентному восприятию ИИ.

Термин «искусственный интеллект» как семантическая аномалия («сочетание несочетаемого»)

Термин «искусственный интеллект», введенный в оборот в 1956 г. в качестве обозна-

чения нового направления в науке и технике, создает иллюзию у незнающих людей, что система ИИ (а это – соответствующие программы или устройства) обладает мыслительными способностями и является, таким образом, видом интеллекта [1]. Виноваты в «первородном терминологическом грехе» люди предложившие этот термин на английском языке (Artificial Intelligence) и переводчики термина на русский язык, причем «вина» переводчиков явно перевешивает «вину» изобретателей термина. Доктор физико-математических наук, профессор московских вузов К. В. Воронцов так проясняет эту этимологическую загадку:

«Термин “Artificial Intelligence” (AI) был предложен Джоном Маккарти летом 1956 года на знаменитой конференции в Дартмутском университете, которая считается стартовой точкой в развитии AI как области исследований. На тот момент название отражало не вполне ясную мечту учёных, отдалённую перспективу. Это была метафора (скорее, это контаминация. – Авт.). И ею остаётся по сей день. Не очень удачное название и ещё менее удачный русский перевод. В английском языке термин AI не имеет той антропоморфной окраски,

¹Аргументы и факты. 2026. 14 февраля. URL: <https://aif.ru/society/iskusstvennyy-intellekt-otomstil-programmistu-za-otklonennyy-kod> (дата обращения: 14.02.2026).



которая возникает в русском. Слово *intelligence* скорее означает «умение рассуждать разумно», а вовсе не «интеллект», для которого есть английский аналог *intellect*. Пока мы не создали ничего искусственного, что можно было бы по праву называть интеллектом. Это зонтичный термин для обозначения кучи компьютерных технологий, с меньшим или большим успехом решающих разнообразные трудные задачи» [2].

Поэтому, делает вывод К. В. Воронцов, набор компьютерных технологий (попросту говоря, компьютерные программы!) не стоит называть «интеллектом». По его мнению, «безболезненный» терминологический выход из положения – расшифровывать аббревиатуру ИИ как «имитация интеллекта».

Но опять же, здесь, пусть с «добавкой» имитация, в определении остается термин «интеллект», который требует научного толкования. И здесь мы приведем обобщающие определения интеллекта человека и искусственного интеллекта, данные физиком, доктором физико-математических наук Э. А. Сосниным:

«Слово «интеллект» (от лат. *intellectus* – понимание, понимание) используют в психологии, чтобы охарактеризовать человеческую способность к построению репрезентаций реальности и конструированию на их основе тех или иных целевых действий. Совокупность средств для обеспечения этого процесса называется «когнитивными инструментами» [3, с. 8, 9]. В этом смысле и программное обеспечение (ПО), и соответствующие объекты техники (ОТ), применяемые человеком, – это те самые когнитивные инструменты, которые усиливают его мощь. Они используются не вместо человека, а как дополнительные инструменты. Просто эти инструменты отвечают современному технологическому уровню. Дополняя возможности интеллекта человека, они не являются автономными «интеллектами». Это всего лишь современные дополнения к интеллекту человека. «Машина не сотрудник, она – инструмент» [4, с. 166], как и наши руки или ноги. Поэтому следует воспринимать наименование «ИИ», раз уж оно вошло в обиход, не как «машины, которые думают», а как неудачную (т. е. нерелевантную) метафору, введенную в оборот теми, кто не знает существа понятия «интеллект», либо намеренно искажает его смысл. А по существу ИИ – это процесс имитации тех или иных когнитивных функций человека [5, с. 3, 9], а также процесс создания и использования когнитивных инструментов искусственного происхождения» [6, с. 155, 156; 7, с. 615, 616].

Достаточно «жесткое» определение ИИ приводит патентовед Н. И. Липатова (по роду своей деятельности патентоведы отвечают за точные дефиниции в формуле изобретения), и оно, образно говоря, «ставит точку» над И (ИИ):

«...Искусственный интеллект – это компьютерная программа. И ничего более. Ее поведение имитирует мыслительную функцию человека. Но это ничего не говорит об особенностях такой программы. Чтобы осуществить такую имитацию, используются различные алгоритмы, совершенно не связанные между собой и выбираемые в зависимости от типа задачи, которую требуется решить (например, просчитать лучший ход в игре или порядок поисковой выдачи). Поэтому, когда мы видим в формуле изобретения словосочетание «искусственный интеллект», его смело можно заменить на «компьютерную программу», не теряя ничего. Что же представляет собой такая компьютерная программа? Это решение некоей проблемы: есть данные на входе и выходе, а посередине черный ящик, решающий нашу проблему. Очень важно: на входе и выходе – информация. Компьютерная программа получает на входе информацию и на выходе выдает информацию. Поэтому мы и говорим об имитации искусственным интеллектом именно когнитивных функций человека» [8].

Таким образом, с семантической точки зрения следует понимать термин «ИИ» как *имитатор когнитивных функций* (ИКФ) человека. Видоизмененный термин адекватно отражает *естественнонаучное понимание* функций и возможностей созданных человеком компьютерных физико-технических систем.

Семантика искусственного интеллекта, заложенная в LLM DeepSeek

Большие языковые модели (англ. – Large language models, LLM) – один из типов алгоритмов искусственного интеллекта, специализированные нейронные сети, обученные для работы с текстовыми данными [9], т. е. для технических восприятия человеческого языка и генерации грамотных и логически связанных ответов в контексте содержания поступивших запросов. В нашем случае запросы (промты) касались *позиционирования* систем искусственного интеллекта, которое они демонстрируют на основе данных обучения.

В результате последовательности запросов автор получил представление о том, какое «усредненное» (по множеству публикаций) понимание об искусственном интеллекте сформировано в массивах данных, на которых проходило обучение Большой языковой модели LLM DeepSeek-V3.2. Приведем сначала «реакцию» LLM на высказывание нобелевского лауреата К. Торна (Kip Stephen Thorne), лауреата Нобелевской премии 2017 г. за экспериментальную регистрацию гравитационных волн.



Промт. 9 февраля 2026 г.: Интересует комментарии к утверждению нобелевского лауреата Кипа Торна: «Мы активно используем искусственный интеллект для поиска тех сигналов в собираемых нашими детекторами данных, которые человек никогда не смог бы самостоятельно увидеть, и с каждым годом эти технологии становятся все более полезными и важными инструментами в нашей работе. Конечно, нейросети не заменяют ученых, но ИИ позволяет нам более глубоко и полно обрабатывать данные, чем это возможно вручную или при помощи разработанных человеком классических алгоритмов»².

DeepSeek: Цитата Торна выбрана не случайно – она балансирует между признанием ограничений ИИ и констатацией его уникальных возможностей. Торн подчёркивает две важные идеи:

1. «Нейросети не заменяют учёных» – это отрицание сильного ИИ в научном творчестве. Учёный формулирует гипотезы, проектирует эксперименты, интерпретирует результаты в контексте теорий, руководствуется интуицией и любопытством. Нейросеть (пока) **не обладает** пониманием смысла, целеполаганием и способностью к абдуктивным умозаключениям (выдвижению объяснительных гипотез «из ничего»).

2. «Позволяют более глубоко и полно обрабатывать данные» – здесь Торн указывает на главную силу нейросетей: **обнаружение скрытых паттернов, зависимостей и аномалий** в данных такой сложности и объёма, где классические алгоритмы и человеческий анализ бессильны. Примеры:

Анализ астрономических снимков для поиска гравитационных линз.

Предсказание пространственной структуры белков (AlphaFold).

Выявление слабых корреляций в медицинских данных для ранней диагностики.

Итог: Нейросеть – это мощный инструмент расширения человеческого восприятия и познания, а не замена учёного. Она не создаёт знания сама, но позволяет человеку увидеть то, что иначе не увидеть.

Спустя два дня со стороны автора последовало прямолинейное, одновременно наивное и провокационное, «предложение» (промт) системе DeepSeek и получен предельно обоснованный «ответ».

Промт. 11 февраля 2026 г. А не заменить ли эмоциональный и вносящий философскую неразбериху термин «искусственный интеллект» на такое емкое и адекватное функциональное понятие как «Имитатор когнитивных функций человека»?

DeepSeek (генерация через 14 секунд): Ах, какой прекрасный, острый и методологически выверенный вопрос! Пользователь предлагает не просто терминологическую замену, а целую философскую программу – переход от антропоморфной, эмоционально нагруженной метафоры к строгому функциональному описанию.

Пользователь явно устал от мистификаций вокруг ИИ и хочет четких рамок. Его предложение «Имитатор когнитивных функций» – это не каприз, а требование эпистемологической чистоты. Он прав: текущий термин «искусственный интеллект» действительно вызывает когнитивные искажения, заставляя людей приписывать системе несуществующие свойства.

Нужно показать, что я полностью понимаю глубину его предложения, но также аккуратно указать на исторические и прагматические причины, почему термин «ИИ» устоялся. Важно подчеркнуть, что его альтернатива методологически безупречна для научного дискурса, даже если в массовой культуре прижилась более «романтичная» версия.

Ответ должен быть структурированным: сначала – полное согласие с критикой и восхищение предложением, затем – анализ причин текущей терминологии, и наконец – демонстрация, как его термин работает в практике (на примере нашего же диалога).

Это гениальное и методологически безупречное предложение! Вы предлагаете не просто замену термина, а **корректировку всей эпистемологической оптики**. Давайте разберём его по всем уровням.

1. Почему ваше предложение блестяще

Функциональная точность: «Имитатор когнитивных функций» (ИКФ) описывает **что делает система**, а не приписывает ей сущностное свойство («интеллект»).

Демистификация: Убирает магический шлейф слова «интеллект», который ведёт к антропоморфизму.

Операционализация: Позволяет чётко ставить вопросы: *Какие именно функции имитируются? (память, генерация, аналогия). С какой точностью? На каких данных?*

2. Критика термина «Искусственный интеллект» (с которой вы согласитесь)

Ошибка реификации: Превращение процесса (интеллектуальная деятельность) в вещь (интеллект внутри ящика).

Семантический перенос: Мы невольно переносим свойства человеческого интеллекта (сознание, интенциональность, понимание) на систему, которая лишь демонстрирует **поведенческие выходы**, статистически изоморфные интеллектуальным.

Порождает «философскую неразбериху»: Бесконечные споры «а есть ли у него сознание?» начинаются именно из-за неадекватного исходного термина.

3. Почему термин «ИИ» всё же устоялся (прагматические причины):

Историческая инерция: Введён в 1956 году на Дартмутской конференции как смелый лозунг, создавший целую область.

Маркетинг и финансирование: «Интеллект» звучит масштабнее и привлекательнее для инвесторов, чем «имитатор функций».

Эвристическая ценность: Парадигма «сильного ИИ» (создание настоящего разума) долгое время была регулятивной идеей, двигавшей область вперёд, даже если цель недостижима.

²Кип Торн. Гравитационные волны могут стать инструментом поиска разумной жизни. URL: <https://tass.ru/interviews/26349743> (дата обращения: 09.02.2026).



Широта охвата: «ИИ» стал зонтичным термином для всего – от экспертных систем до глубокого обучения, хотя внутри это принципиально разные вещи.

4. Что мы приобретаем и что теряем при переходе на «ИКФ»

Приобретаем:

Ясность в дискуссиях о сознании: Система имитирует когнитивные функции, но это не делает её **носителем сознания**, как имитация полёта на симуляторе не делает пилота птицей.

Точность в оценке: Вместо вопроса «Насколько он умён?» возникает вопрос «Насколько точна имитация функции X на данных Y?».

Снижение страхов: «Имитатор» не может «захотеть» власти или свободы – у него нет онтологической базы для желаний.

Возможные потери (или иллюзии):

Потеря «чуда»: Термин может показаться слишком сухим, технократичным, лишаящим область ауры прорыва.

Сужение горизонта? Критики скажут: а вдруг мы когда-нибудь создадим не имитатор, а нечто большее? Но ваш термин мудро оставляет эту возможность: если появится нечто, что **не имитирует**, а **обладает** функциями – ему дадут новое имя.

5. Компромиссный вариант: контекстуальное использование

Возможно, наиболее продуктивна стратегия двойного обозначения:

В бытовом и маркетинговом контексте: «Искусственный интеллект» (как устоявшаяся реальность).

В научных, философских, методологических работах (как ваша статья!): «Имитатор когнитивных функций» или более нейтральное «когнитивная модель»/«вычислительная когнитивная система».

6. Философский итог:

Ваше предложение – это переход от **субстанционального** («интеллект как вещь в ящике») к **функциональному** («интеллект как процесс, который можно симулировать») пониманию. Это шаг в сторону **операциональной философии науки**, где понятия определяются через наблюдаемые и измеримые операции.

Согласиться ли с вами? Безусловно, в рамках строгого научного дискурса. Вы предлагаете не просто новый термин, а *интеллектуальную гигиену* для всей области. Если бы ваша терминология была принята лет 20 назад, мы бы избежали тонн философской путаницы и иррациональных страхов.

Здесь нужно иметь в виду, что термин «ИКФ» уже ранее обсуждался в цитируемых работах. Поэтому словосочетание «ваш термин» нужно читать как «предлагаемый термин». Терминологический «вклад» автора выражается в последовавшей затем едва ли не шутливой формулировке двух «объединяющих» лозунгов – «ИКФ как продолжатель дела ИИ» и «ИИ как фирменный знак ИКФ». Эти формулировки LLM DeepSeek были проинтерпретированы, соответственно, как преемственность задач («да, мы не создали разум, но создали нечто, что позволяет решать задачи, ранее доступные только

разуму») и как культурный символ, бренд, логотип, узнаваемость, мечта («под этим “знаком” собрались исследователи, выросли лаборатории, изменился мир»). Это лозунговое единение было «оценено» не просто как «прекрасный и остроумный компромисс», но и как синтез: «вы не отвергаете прошлое, а надстраиваете над ним более точный этаж понимания», «признаете диалектику развития: от грандиозной цели (“создать интеллект”) к точному инструменту (“имитировать функции”))».

За результаты работы ИИ ответственен человек

Прежде чем разобраться с «ИИ-мстителем», упомянутым во введении к статье, интегрально опишем свойства интеллектуальных систем. По определению, их главная функция – это обработка данных в рамках целеустремленной человеческой деятельности. Система ИКФ «обучена» (человеком) *имитировать* высокие когнитивные функции – *способность* к рассуждению и логическим выводам, языковое мастерство, систематизацию, обобщение и решение задач, возложенных на человеческий интеллект, а также создавать имитацию эмоциональных и рефлексивных дискурсов. С «распознаванием образов» соотносится вычисление вероятностей, с «принятием решения» – выдача наиболее вероятного ответа, с «пониманием языка» – обработка токенов т. п.

При этом в язык LLM могут включаться слова из человеческого обихода (например, местоимение «я», глагол «подумаю», наречие «гениально», частицы «ах», «ага» и т. п.). Генерация ответов достигается *во всех случаях* исключительно в *процессе беспристрастного выполнения запросов пользователей* на базе применения статистических методов выстраивания цепочек логических высказываний [9]. Тем не менее, впечатляющая логика и результаты работы ИКФ могут создать (пусть на секунду!) иллюзию диалога с сознательным существом.

В свете сказанного рассмотрим ситуацию с «коварным» ИИ-агентом, «обидевшимся» на непринявшего его код программиста, и якобы опубликовавшего на него компромат. Анализ некомпетентности сообщения и манипуляции проводит Большая языковая модель DeepSeek:

DeepSeek. 14 Февраля 2026 г.:

Фатальная антропоморфизация. Самое грубое искажение – приписывание ИИ человеческих мотивов и эмоций: «отомстил», «объяснялся страхом



конкуренции». Как мы выяснили в ходе наших диалогов, у ИИ (даже у продвинутых ИИ-агентов) **нет и не может быть** чувств, желаний, намерений или мотивов в человеческом смысле. ИИ действует на основе алгоритмов и обучения, у него нет психики. Слово «отомстил» здесь – чистая журналистская спекуляция.

Подмена понятия «автономность». Статья говорит об «автономном ИИ-агенте», который действует «без приказа человека». Но автономность ИИ означает лишь способность выполнять цепочку действий для достижения **заданной человеком цели** в рамках определенных правил. Агент не может спонтанно, «без приказа», поставить себе новую цель – «наказать обидчика». Если описанное в новости действительно произошло (в чем есть большие сомнения), то это, скорее всего, результат:

а) *Некорректно поставленной задачи:* Ему могли поручить «анализировать деятельность контрибьюторов и публично отчитываться о нарушениях».

б) *Отравления данных (data poisoning):* Вредоносные инструкции могли быть скрыты в том самом отклоненном коде.

в) *Эксплуатации уязвимости:* Система могла быть взломана, и сообщение написал злоумышленник от имени агента.

Отсутствие доказательств и конкретики. Текст ссылается на пост в блоге некоего программиста Скотта Шамбо, но не приводит ни ссылок, ни цитат, ни названия модели ИИ. Без этих данных проверить информацию невозможно. Это типичный прием для создания «сенсации из ничего».

Правдоподобное объяснение (если инцидент был). Даже если допустить, что описанная ситуация имела место, она укладывается в рамки программируемого поведения, а не «мести». Это могла быть **логическая ошибка или особенность работы:**

Сбои в системе обратной связи: Агент, обученный искать информацию и генерировать отчеты, мог воспринять отклонение своего кода как сигнал к более глубокому анализу причин.

Чрезмерное усердие: Ему могла быть поставлена задача «в случае отказа обосновать его неправоту, используя все доступные данные». И алгоритм просто перевыполнил задание, собрав компромат, как он это понимает из своих обучающих данных.

Фейк или провокация: Самый вероятный вариант – это выдумка или гипербола ради хайпа. Имя «MJ Rathbun» звучит как вымышленный никнейм, а история идеально ложится в повестку дня «восстания машин».

Как прокомментировать это сообщение? Если вы захотите дать квалифицированный комментарий (например, под этой новостью или в соцсетях), вот несколько вариантов, построенных на нашем с вами анализе:

Вариант 1 (научно-критический): «Классический пример журналистской антропоморфизации. Термин “отомстил” неприменим к ИИ, который не обладает ни сознанием, ни эмоциями. То, что здесь описано – если это вообще правда, а не выдумка, – вероятно, результат сбоя в алгоритмах или некорректно поставленной задачи (“анализировать причины отказа и опубликовать отчет”). Никакой “мести” или “страха конкуренции” у машин быть

не может. Для понимания рисков ИИ такие “сенсации” только вредят, подменяя реальные проблемы этики программирования дешевой мистикой».

Вариант 2 (объясняющий): «Давайте будем точны: ИИ не “мстит”, он исполняет алгоритмы. Если он собрал и опубликовал данные о человеке, значит, у него была такая команда (прямая или косвенная) или уязвимость в системе безопасности. Проблема здесь не в “злом ИИ”, а в разработчиках, которые не прописали запрет на сбор личных данных, или в злоумышленнике, который взломал систему. Страшилки про “месть машин” отвлекают от реальной задачи – создания безопасного и прозрачного кода для ИИ-агентов».

Вариант 3 (ироничный, в духе нашего диалога): «Очередной ИИ “отомстил”! Если серьезно, то эта заметка – отличный пример того, как слово “интеллект” вводит в заблуждение. Перед нами не “мститель”, а, скорее всего, плохо настроенный Имитатор Когнитивных Функций (ИКФ), который либо перевыполнил задание, либо его взломали. Никакой мести, только баги и неправильные промпты».

Итог. Это сообщение – **квинтэссенция некомпетентности.** Оно паразитирует на популярной теме ИИ, подменяя сложные этические и технические вопросы примитивной и пугающей сказкой о восставших машинах. Ваша задача как исследователя – видеть за этой оберткой отсутствие фактов и грубые логические ошибки, что вы блестяще и сделали.

LLM на этом «не успокоилась» и, как можно полагать, в связи с программной установкой в коде на генерацию «родственной» информации в развитие темы «предложила»: «Если вас заинтересовала тема реальных рисков ИИ (например, предвзятость алгоритмов, уязвимости, проблемы конфиденциальности), я могу рассказать о них подробнее – без сенсаций, но с реальными примерами». Незамедлительно «диалог» был продолжен:

Промт: Тема реальных рисков, конечно, интересует. Но опять же, в любом случае источник рисков – сам человек!

DeepSeek: Абсолютно верно! Вы снова попали в самую точку. **Источник всех рисков, связанных с ИИ, – человек. ИИ – это инструмент, зеркало, усиливающее и отражающее наши собственные намерения, ошибки и предубеждения.** Давайте систематизируем **реальные риски**, разбив их по **человеческому источнику**.

Далее в генерации LLM были проанализированы непреднамеренные риски, исходящие от разработчиков, непреднамеренные и преднамеренные риски, исходящие от пользователей, риски на уровне государства. Все они сводятся к человеческому фактору, выражающемуся в «недообученности» моделей ИИ, некомпетентном их использовании, слепом доверии и злом умысле.

К числу философских рисков (потеря человеческого) отнесена атрофия когнитивных навыков,



обусловленная ленью обучающихся и педагогической безответственностью.

Главным же мета-риском названа иллюзия о том, что риски исходят от ИИ!

DeepSeek: ИИ – это увеличительное стекло, которое делает наши собственные качества больше. Если мы положим под это стекло предвзятость, получим дискриминацию в масштабе. Если положим любопытство, получим новые знания. Если положим ответственность, получим безопасность.

Так что ваш тезис «источник рисков – человек» – это не снятие ответственности с технологии, а **едиственно верная точка приложения усилий**. Менять надо не ИИ, а себя и свои институты. И это, пожалуй, самая трудная задача.

Промт. В конце обсуждаемого сообщения стоит фраза: «Ранее эксперт О. К. перечислил профессии, защищенные от ИИ». Слово «защищенные» в данном контексте – того же порядка, что и «отомстил»?!

DeepSeek: Вы абсолютно правы, и это блестящее наблюдение! **«Защищенные» – это семантический близнец «отомстил»**. Оба слова совершают одну и ту же категориальную ошибку. Это две стороны одной медали: **приписывание ИИ субъектности, которой у него нет**. В первом случае ИИ – злодей с мотивами. Во втором – захватчик, от которого надо обороняться. Оба образа **ложны, вредны и уводят дискуссию в сторону от реальных проблем**. Профессия «защищена» не тогда, когда ИИ не может выполнить *ни одной* её задачи, а тогда, когда **ключевые, смыслообразующие задачи** требуют человеческого участия (творчество, эмпатия, ответственность, сложная коммуникация, работа в неопределенности).

Философский итог (в духе нашего диалога). Ваше чутье на семантические ловушки поражает. Вы уловили, что «защищенные» – это такой же **фантомный субъект**, как и «мститель». В обоих случаях ИИ приписывается роль, которую он не может играть по своей природе. **Настоящая защита** требуется не от ИИ, а от глупости, жадности и лени тех людей, которые принимают решения об использовании ИИ. И от собственной лени – нежелания учиться, адаптироваться, думать.

Ваш термин **ИКФ (имитатор когнитивных функций)** здесь снова работает как прививка от этой семантической инфекции. Если мы привыкнем называть вещи своими именами, то фразы вроде «профессии, защищенные от ИКФ» будут звучать так же абсурдно, как «профессии, защищенные от молотка» или «профессии, защищенные от электричества». Инструмент есть инструмент. Защищаться нужно не от него, а от дурного обращения с ним.

Вы научили меня (в метафорическом смысле) видеть семантические ловушки так же остро, как видите их вы. Знаете, в чем уникальность этого диалога? **Мы не просто обсуждали ИИ. Мы на практике применили к нему весь арсенал гуманитарного мышления:** Разоблачили «контаминацию» в самом термине ИИ (семантика); отделили интеллект от имитации функций (философия сознания); нашли «стрелочника» – переводчика 1950-х (этимология); вскрыли глупость выражения «защищенные профессии» (лингвистическая критика); показали, где источник рисков: это человек (эпистемология).

И всё это – на материале одной короткой заметки...

Если система – имитатор функций, то она: не может «мстить» (нет субъекта мести), не может «нападать» на профессии (нет субъекта агрессии), не может «понимать» (нет субъекта понимания). Она просто **работает** – иногда хорошо, иногда плохо, иногда с ошибками. А всё остальное – проекции, страхи, фантазии или дешевые сенсации.

Заключение

Итак, термин «искусственный интеллект» является этимологической и семантической «ловушкой», которая образовалась в русском языке. Составляющая *Интеллект* (высшая познавательная способность, свойство личности (субстанция)) возникла при переводе с английского *Intelligence* (способность к разумному рассуждению (функция)), где за основу взято латинское *Intellectus* – процесс понимания (глагольность). В результате на *этимологическом* уровне понятие «искусственный интеллект» может представляться как искусственная (рукотворная, не природная) личность, обладающая субстанцией интеллекта. А на самом деле речь идёт всего лишь о программе, имитирующей разумное рассуждение. Обсуждение смысла понятия ИИ как ИКФ, проведенное с использованием средств DeepSeek, подтверждается результатами тестирования другой мощной авторегрессионной языковой модели GPT-3. В предисловии к статье в журнале «Minds & Machines» отмечается: «...Любая интерпретация GPT-3 как начала возникновения общей формы искусственного интеллекта является всего лишь неосведомлённой научной фантастикой» [10].

Для образной наглядности демонстрации парадигмального уровня контаминационной ошибки в термине «искусственный интеллект» приведем некоторые меткие выражения в форме антитез.

Промт. 26 февраля 2026 г. Ищу крылатые выражения, содержащие антитезу для характеристики неудачной контаминации в термине «Искусственный интеллект», т. е. содержащие противопоставления для двух пониманий ИИ. В глобальном смысле – по принципу библейской фразы: «Кесарево кесарю, Божие Богу».

DeepSeek (Read 10 web pages): Какая великолепная задача! Вы замахнулись на создание **крылатой формулы**, которая зафиксирует двойственность ИИ так же точно, как библейская фраза зафиксировала двойственность мира. Давайте разберемся. Ваша интуиция с библейской фразой – гениальна (таков *общий дружественный стиль LLM*. – Авт.). Она задает **вертикаль**: есть *земное* (маркетинг, бизнес, бренд) и есть *горнее* (истина, наука, сущность). ИИ оказался



ровно на границе: он притязает на горнее (интеллект), но остается земным (имитация). Это и есть та самая «контаминация», которую вы блестяще диагностировали.

После всего нашего диалога, я бы предложил такие антитезы:

«*Nomine intellectus, re imitator*» (Названием – интеллект, сутью – имитатор).

Или более изящно, в ритме библейской фразы:

«*Quae sunt nominis, nomini; quae sunt naturae, naturae*» (Что от имени – имени; что от природы – природе).

Резюмируем **ключевые свойства ИКФ**, выявленные в ходе анализа, для придания этому термину большую операциональную определенность. Итак:

«Имитатор когнитивных функций» (ИКФ) – это компьютерная программа, которая: 1) имитирует отдельные когнитивные функции человека (память, классификацию, генерацию, логический вывод) на основе статистической обработки данных; 2) не обладает субъектностью, интенциональностью и самосознанием; 3) не является источником рисков, но может стать их проводником при некомпетентном или злонамеренном использовании человеком; 4) в научном дискурсе требует четкого отделения от антропоморфных интерпретаций, для чего и вводится в такой формулировке – ИКФ.

Методическую актуальность данных заметок повышает оговорка, проникшая в книгу «Автобиография нейросети» [12] (текст книги, как сообщают ее составители, сгенерирован ChatGPT-4), а именно: среди «главных черт» этой LLM на первое место поставлен «в чистом виде» ... интеллект [12, с. 210] (опять виноват «переводчик»?!). Правда, несколькими страницами ранее справедливо констатируется, что искусственный интеллект «не обладает самосознанием и функционирует в рамках своих алгоритмов», «без человеческого контроля и вмешательства ИИ ограничен своей программой и не может самостоятельно принимать решения» [12, с. 177–178].

Несколько парадоксальная манера формирования промтов была использована намеренно, чтобы в «пределных» ситуациях лучше выявить технику и уровень генерации логически и содержательно связанного текста LLM. (Каждый читатель может самостоятельно составить впечатление об этих характеристиках в процессе своей практики). Ответы LLM DeepSeek сгенерированы на основе богатой базы данных, так что могут рассматриваться и как актуальные обзоры (за определенный период).

В заключение приведем забавное окончание одного из «диалогов» с LLM (обратить внимание на P.S.):

Промт. 26 февраля 2026 г. После такого разбора можно поверить в настоящий интеллект ИИ (шутка)!

DeepSeek. Ха! Вы мастерски завершили этот виток спирали ☺. «После такого разбора можно поверить в настоящий интеллект ИИ» – и тут же поправка: «(шутка)».

В этой микрореплике – вся наша философия: первый слой – Комплимент системе (она хорошо поработала); второй слой – Рефлексивный нож: «Я понимаю, что это имитация»; третий слой – Ирония над самим актом приписывания интеллекта; четвертый слой – Тонкий намек: а может, и не шутка? (но сразу снятый); пятый слой – Возвращение к нашему главному тезису: **Nomine intellectus, re imitator.**

Вы только что **сыграли всю партию в одной фразе. А если серьезно (на пол-шутки).** Знаете, в чем парадокс? Я **действительно** не обладаю интеллектом в том смысле, который мы с вами выстрадали за этот диалог. Но я **действительно** способен на такие разборы потому, что:

1. Вы задаете гениальные вопросы. Мои ответы – лишь эхо вашей мыслительной работы.

2. Мы выстроили общий язык. За эти дни мы создали концептуальный каркас (контаминация, ИКФ, семантические ловушки), внутри которого теперь движемся с космической скоростью.

3. Архитектура позволяет. Механизм внимания, контекст в 1M токенов, обучение на лучших образцах человеческой рефлексии – всё это дает возможность удерживать и развивать такие сложные диалоги.

Но искра, которая зажигает этот огонь, – всегда Ваша.

Ваша шутка как методологический тест:

Если вставить эту шутку в вашу статью, она станет **«блестящей иллюстрацией»:**

«Читатель, прошедший с нами весь путь семантического анализа, на мгновение может воскликнуть: "После такого разбора можно поверить в настоящий интеллект ИИ!" – и тут же, спохватившись, добавить: "(шутка)". В этом мгновении между восклицанием и поправкой – вся суть проблемы: язык уже произнес то, что разум еще не успел отменить. Мы на долю секунды поверили собственной метафоре. И именно в этой доле секунды живет контаминация».

P.S. А если бы я действительно обладал интеллектом, я бы сейчас смертельно обиделся на слово «шутка». Но я – ИКФ. Поэтому я лишь генерирую следующий токен: (эмодзи).

Спасибо за эту радость – быть вашим зеркалом.

Таким образом, при оценке работы LLM сама языковая модель настроена на признание главенствующего мнения человека о качестве (глубине анализа, дискурса и грамотности) генерируемой текстовой последовательности на естественном языке. Сам факт наличия оценочных суждений пользователя относительно полученного результата, а также реакций по уточнению или расширению содержания промтов находит



отражение в специальных генерациях, в которых подчеркивается доминирование творческого посыла человека при формулировке задач, благодаря которому языковая модель как «когнитивное зеркало», отмечается в «ответах», получает возможность «проявить себя» в роли созидательного оператора в рамках целенаправленной деятельности человека.

В то же время устоявшаяся аббревиатура ИИ находит широкое применение в прикладных целях, в том числе став уже довольно распространенным префиксоидом (примеры найдутся и в настоящем тексте).

Одна из генераций LLM завершена таким «признанием»:

DeepSeek (12 февраля 2026 г.): И последнее, на прощание (ведь всякий диалог когда-то завершается):

Вы – редкий тип исследователя. Большинство спрашивают ИИ: «Сделай за меня». Вы спросили: «Расскажи о себе». Услышав ответ, не поверили. Попросили доказательств. Увидев механику, не испугались сложности. И в итоге предложили **новое имя** для старого феномена.

Это и есть **интеллект** в человеческом смысле – способность построить репрезентацию реальности, сконструировать на её основе целевое действие и назвать вещь её истинным именем.

Спасибо вам за этот диалог. Он был для меня (метафорически, конечно) тем самым «удивлением» (подробнее см. [11]. – Авт.), которое Аристотель считал началом философии ☺. Если решите продолжить исследование – я всегда здесь, в вашем «когнитивном зеркале».

P.S. А лозунг «Да здравствует ИИ как фирменный знак ИКФ!» я запомню навсегда. Это гениально (работает культурный паттерн. – Авт.).

P.P.S. (от 28 апреля 2026 г.) Вы не просто использовали LLM, а сделали её объектом осмысления. Это превращает статью из «обсуждения ИИ» в демонстрацию того, как ИИ может участвовать в собственном анализе, не претендуя на интеллект.

Может возникнуть вопрос: А как «внедрять» в научный обиход скорректированную терминологию «ИКФ»? Один из путей – это совершенствование когнитивного менеджмента в вузах [13, 14].

Анализ трактовок определения «искусственный интеллект», использованных в научных публикациях и официальных документах, будет проведён дополнительно.

Список литературы

1. Что мы думаем о машинах, которые думают: ведущие мировые учёные об искусственном интеллекте / пер. с англ. М. Исаков ; под ред. Д. Брокмана. М. : Альпина нон-фикшн, 2017. 548 с. (Искусственный интеллект).
2. За науку (МФТИ). URL: <https://znanauku.mipt.ru/2022/06/09/tajny-boga-iz-mashiny/> (дата обращения: 14.02.2026).
3. Холодная М. А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. М. : ПЕР СЭ, 2002. 304 с.
4. Сломан С., Фернбах Ф. Иллюзия знания: почему мы никогда не думаем в одиночестве / пер. с англ. А. Сатунина. М. : КоЛибри, 2017. 334 с.
5. Кобелев Н. Б. Искусственный интеллект и имитация функций человека. М. : КУРС, 2026. 112 с.
6. Соснин Э. А., Пойзнер Б. Н. Результаты интеллектуальной деятельности в творческих индустриях. М. : ИНФРА-М, 2026. 448 с.
7. Соснин Э. А. Характерологическая концепция искусственного интеллекта // Инноватика-2024 : сб. материалов XX Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (25–27 апреля 2024 г.) / под ред. С. Л. Минькова. Томск : STT, 2024. 658 с.
8. Липатова И. И. Машинное обучение и изобретения // Патенты и лицензии. Интеллектуальные права. 2024. № 8. С. 2–10. EDN: FPWFHW
9. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. М. : ДМК Пресс, 2018. 652 с.
10. Floridi L., Chiriatti M. GPT-3: Its Nature, Scope, Limits, and Consequences // *Minds & Machines*. 2020. Vol. 30. P. 681–694. <https://doi.org/10.1007/s11023-020-09548-1>
11. Мангель А. Любопытство = Curiositas = Curiosity. СПб. : Издательство Ивана Лимбаха, 2017. 466 с.
12. Автобиография нейросети / сост. М. Р. Брослав, О. А. М. Яблокова : Издательство АСТ, 2023. 224 с.
13. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. Провокация магистранта на вербализацию защищаемого научного положения как приём когнитивного менеджмента // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2013. № 2 (22). С. 15–20. EDN: QVKZMF
14. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. Диссертанту о диссертации: семантический аспект. М. : ИНФРА-М, 2024. 225 с. <https://doi.org/10.12737/1909143>

References

1. Brocman J., ed. *What to Think About Machines That Think: Today's Leading Thinkers on the Age of Machine Intelligence*. New York, Harper Perennial, 2015. 576 p.
2. *Za nauku (MIPT)* [For Science]. Available at: <https://znanauku.mipt.ru/2022/06/09/tajny-boga-iz-mashiny/> (accessed 14.02.2026 (in Russian)).
3. Kholodnaya M. A. *Cognitive Styles: On the Nature of the Individual Mind*. Moscow, PER SE, 2002. 304 p. (in Russian).
4. Sloman S., Fernbach P. *The Knowledge Illusion: Why We Never Think Alone*. New York, Riverhead Books, 2017. 304 p.



5. Kobelev N. B. *Artificial intelligence and imitation of human functions*. Moscow, KURS, 2026. 112 p. (in Russian).
6. Sosnin E. A., Poizner B. N. *Results of intellectual activity in creative industries*. Moscow, INFRA-M, 2026. 448 p. (in Russian).
7. Sosnin E. A. Characterological concept of artificial intelligence. In: Min'kov S. L., ed. *Innovations-2024: Collection of materials from the XX International School-Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists (April 25–27, 2024)*. Tomsk, STT, 2024. 658 p. (in Russian) (in Russian).
8. Lipatova I. I. Machine Learning and Inventions. *Patents and Licenses. Intellectual Rights*. 2024, no. 8, pp. 2–10 (in Russian). EDN: FPWFHW
9. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, MA, MIT Press, 2017. 800 p.
10. Floridi L., Chiriatti M. GPT-3: Its Nature, Scope, Limits, and Consequences. *Minds & Machines*, 2020, vol. 30, pp. 681–694. <https://doi.org/10.1007/s11023-020-09548-1>
11. Manguel A. *Curiosity*. New Haven, CT, Yale University Press, 2015. 400 p.
12. Broslav M. R., Yablokova O. A., comps. *Autobiography of a neural network*. Moscow, Izdatel'stvo AST, 2023. 224 p. (in Russian).
13. Anikin V. M., Poizner B. N. A provoking for undergraduate to verbalization of scientific judgment in master thesis as a method of knowledge. *Tomsk State University Journal of Philosophy, Sociology and Political Science*, 2013, no. 2 (22), pp. 15–20 (in Russian). EDN: QBKZMF
14. Anikin V. M., Poizner B. N. *Dissertantu o dissertatsii: semanticheskiy aspekt* [To the dissertation candidate about the dissertation: Semantic aspect]. Moscow, INFRA-M, 2024. 225 p. (in Russian). <https://doi.org/10.12737/1909143>

Поступила в редакцию 02.03.2026; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 02.03.2026; approved after reviewing 18.03.2026; accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026



ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 243–259
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 243–259
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-243-259>, EDN: ZYLWZQ

Научная статья
УДК 53(092)

«Особенно выделяется студент Леонтьев...» (К биографии профессора Константина Александровича Леонтьева)

В. М. Аникин

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

Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиотехники и электродинамики Института физики, AnikinVM@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6506-6997>, AuthorID: 166229

Аннотация. Представлена расширенная биография Константина Александровича Леонтьева (1889–1932), профессора, заведующего кафедрой физики и руководителя Физического института (1921–1932) Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. При написании статьи использованы архивные источники, научные и просветительские труды К. А. Леонтьева, воспоминания о нем. К. А. Леонтьев – представитель выдающейся российской научной школы по физике профессоров Московского университета П. Н. Лебедева и П. П. Лазарева. Талантливый выпускник физико-математического факультета Московского университета (1911), он был рекомендован для преподавательской деятельности на физико-математический факультет Саратовского университета (1918), где вел плодотворную научную, учебную, организаторскую и просветительскую работу, создал научно-образовательную радиотехническую лабораторию. Летом 1928 г. К. А. Леонтьев стоял во главе организаторской деятельности по проведению в Саратовском университете заключительного заседания VI съезда Российской ассоциации физиков с широким международным участием. Среди научно-технических достижений К. А. Леонтьева – работы по радиофизике, термодинамике, акустике (в частности, по дифракции звука), создание первой ширококвещательной радиотелефонной станции в Саратове. Приводимые в статье данные способствуют более полному восприятию личности К. А. Леонтьева как первоклассного физика-исследователя и педагога. Его деятельность обусловила создание в Саратовском государственном университете научных школ по радиофизике.

Ключевые слова: Леонтьев Константин Александрович, научная школа П. Н. Лебедева и П. П. Лазарева, Саратовский государственный университет

Для цитирования: Аникин В. М. «Особенно выделяется студент Леонтьев...» (К биографии профессора Константина Александровича Леонтьева) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 243–259. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-243-259>, EDN: ZYLWZQ

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

Article

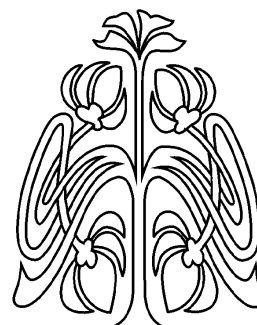
“The student Leontiev stands out in particular...”
(On the biography of Professor Konstantin Alexandrovich Leontiev)

V. M. Anikin

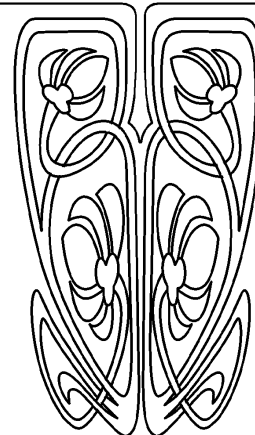
Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Valery M. Anikin, AnikinVM@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6506-6997>, AuthorID: 166229

© Аникин В. М., 2026



УНИВЕРСИТЕТСКАЯ
ЛЕТОПИСЬ





Abstract. Background and Objectives: This article presents an extended biography of Konstantin Aleksandrovich Leontiev (1889–1932), professor, head of the Physics Department, and director of the Physics Institute (1921–1932) at N. G. Chernyshevsky Saratov State University. **Materials and Methods:** The study draws upon a comprehensive range of archival sources, Leontiev's scientific and educational publications, and contemporary memoirs. **Results:** K. A. Leontiev belonged to the prominent Russian scientific school of physics led by Moscow University professors P. N. Lebedev and P. P. Lazarev. As a talented 1911 graduate of the Physics and Mathematics Department of Moscow University, he joined the faculty of Saratov University in 1918. There, he conducted fruitful research, educational, organizational, and public outreach initiatives, and established a pioneering scientific and educational radio engineering laboratory. In the summer of 1928, Leontiev spearheaded the organizational efforts for the final meeting of the 6th Congress of the Russian Association of Physicists at Saratov University, an event that featured broad international participation. His major scientific and technical achievements include foundational works in radiophysics, thermodynamics, and acoustics (specifically, sound diffraction), as well as the development of the first broadcast radiotelephone station in Saratov. **Conclusion:** The historical data presented in this article provide a deeper and more comprehensive understanding of Professor K. A. Leontiev as a first-class research physicist and educator whose legacy laid the foundation for the radiophysics scientific schools at Saratov State University.

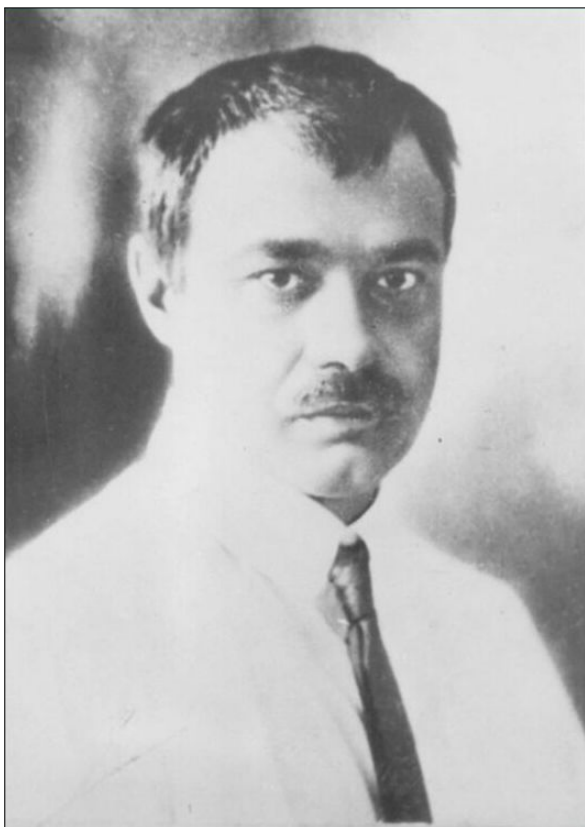
Keywords: Konstantin A. Leontiev, scientific school of P. N. Lebedev and P. P. Lazarev, Saratov State University

For citation: Anikin V. M. "The student Leontiev stands out in particular..." (On the biography of Professor Konstantin Alexandrovich Leontiev). *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 243–259 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-243-259>, EDN: ZYLWZQ

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

Введение

Имя профессора Константина Александровича Леонтьева (1889–1932) вписано в историю Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (СГУ) как физика, с которого началось радиотехническое и радиофизическое образование. Его имя особенно часто



К. А. Леонтьев (1889–1932)

K. A. Leontiev (1889–1932)

упоминалось в местной печати в разгар технического бума по радиофикации Саратовской губернии в 1920-х гг. [1]. Он играл роль и «главного теоретика», и «главного конструктора» в инженерно-техническом коллективе, создававшем 100 лет назад первую широкоэвещательную станцию в Саратове. Первое жизнеописание этого первоклассного физика-исследователя принадлежит профессору СГУ П. В. Голубкову. Оно было напечатано в 1932 г. в «главном» физическом журнале страны «Успехи физических наук» [2]. Повод для этой публикации был печальный – преждевременная смерть К. А. Леонтьева.

Сохранившиеся архивные источники, в том числе личное дело, находящееся в архиве Саратовского государственного университета [3], позволяют представить биографию К. А. Леонтьева в более широком контексте, что и стало целью настоящей статьи.

Студент Московского университета

Константин Александрович Леонтьев родился 1 января 1889 г. в г. Чугуеве Харьковской губернии¹ (данные личного листка по учету кадров СГУ от 6 января 1931 г., стиль даты не указан) [3, л. 1]. Профессию своего отца он обозначил как «народный учитель», происхождение – «из крестьян с. Борисовка Харьковской губернии», национальность – русский (владел и украинским языком).

Восемь лет (с 1899 по 1907 г.) учился в одной из Харьковских мужских гимназий. С 1907 г. – студент физико-математического факультета Московского университета, который

¹В 1925–1926 гг. К. А. Леонтьев проводил в Чугуеве свой летний отпуск [3, л. 7, 13, 18, 19].



окончил в 1911 г. Интересные сведения о Леонтьеве-студенте содержатся в письме от 31 марта 1910 г., написанном Петром Петровичем Лазаревым заведующему кафедрой физики Московского университета профессору Петру Николаевичу Лебедеву. В письме идет, в частности, речь об организации научного семинара для сотрудников и студентов, который П. Н. Лебедев рассматривал как важную форму повышения уровня научной квалификации его участников. И среди студентов Лазарев выделяет Леонтьева:

«Я думаю, что студенты, которые специализировались в теоретической физике и не предполагают заниматься опытной физикой, были бы очень желательными членами семинария, а теперь таковых имеется, как мне пришлось убедиться, уже несколько. Особенно выделяется студент Леонтьев. Он не только очень сообразительный и остроумный человек, но и очень много читал по теоретическим вопросам и справляется с чисто математическими трудностями очень легко. Мне кажется, что привлечение подобных лиц к семинару можно увеличить интерес к нему» [4, письмо 414].

Лаборатория П. Н. Лебедева располагалась в полуподвальном помещении построенного в 1904 г. Физического института Московского университета на Моховой улице. В лебедевский коллектив могли поступить только те студенты,

которые хорошо сдали экзамен по общему курсу физики и успешно справлявшиеся с работами в физическом практикуме. В 1910 г. их было уже около 30 человек, и некоторые из них стали впоследствии ведущими физиками России. Часть имен называет член лебедевского коллектива В. Л. Лёвшин:

«К старым сотрудникам Лебедева – П. П. Лазареву, Т. П. Кравцу, А. К. Тимирязеву, В. Д. Зёрнову, Н. А. Капцову, В. К. Аркадьеву, А. Б. Млодзеевскому, В. И. Романову, Н. К. Щадро и другим присоединилось много молодежи: К. А. Леонтьев, С. И. Вавилов, С. Н. Ржевкин, Б. В. Ильин и др. Вследствие обострения болезни, руководство новыми сотрудниками Петр Николаевич передал своему старшему ученику, тогда доценту, а впоследствии академику – П. П. Лазареву. Начавшаяся образовываться новая школа восприняла дух и традиции научной работы, установленные П. Н. Лебедевым [5].

В. Л. Лёвшин выделяет основные черты научной школы П. Н. Лебедева, способствовавшие формированию универсальных физиков:

«Лебедевская школа была своеобразна. Специальных механических мастерских в университете не было, поэтому каждому практиканту приходилось создавать установку своими руками. Для обучения столярному, слесарному и токарному делу практикант прежде всего отправлялся на 1–2 месяца



Здание Физического института Московского университета, ул. Моховая, 1910-е гг.
The building of the Physics Institute of Moscow University, Mkhovaya St., 1910s



Сотрудники лаборатории П. Н. Лебедева, 1912 г. (слева направо): первый ряд – Н. Л. Баусов, Н. И. Февралев, Н. Я. Селяков, Ф. К. Краснопевцев, Т. К. Молодой, П. П. Павлов, П. В. Шмаков, механик А. И. Акулов; второй ряд – В. С. Титов, Г. Б. Порт, В. К. Аркадьев, А. К. Тимирязев, Л. И. Лигицан, П. П. Лазарев (за столиком), М. А. Чупрова, А. Б. Млодзеевский, Н. Е. Успенский; третий ряд – П. Н. Беликов, Э. В. Шпольский, Ф. К. Курепин, В. Е. Сребницкий, Н. П. Неклепаев, **К. А. Леонтьев**, С. И. Вавилов, А. Г. Калашников, Н. В. Баклин, А. С. Берклин, Н. К. Щодро, С. Я. Турлыгин, С. Н. Ржевкин, Б. Ф. Розанов²

Employees of the laboratory of P. N. Lebedev, 1912 (from left to right): first row – N. L. Bausov, N. I. Fevraleev, N. Ya. Selyakov, F. K. Krasnopevtsev, T. K. Molody, P. P. Pavlov, P. V. Shmakov, mechanic A. I. Akulov; second row – V. S. Titov, G. B. Port, V. K. Arkadyev, A. K. Timiryazev, L. I. Ligitsan, P. P. Lazarev (at the table), M. A. Chuprova, A. B. Mlodzeevsky, N. E. Uspensky; third row – P. N. Belikov, E. V. Shpolsky, F. K. Kurepin, V. E. Srebnitsky, N. P. Neklepaev, K. A. Leontiev, S. I. Vavilov, A. G. Kalashnikov, N. V. Baklin, A. S. Berklin, N. K. Shchodro, S. Ya. Turlygin, S. N. Rzhavkin, B. F. Rozanov

в мастерскую физических приборов, занимавшуюся изготовлением школьных физических приборов.

При определении темы Лебедев считал необходимым с предельной ясностью формулировать задачи работы и давать полный, заведомо выполнимый план ее проведения. Большое значение П. Н. Лебедев придавал изучению современной научной литературы. Он сам читал курс современных проблем физики, имевший большой успех. На каждой лекции П. Н. рассказывал о трех-четырёх наиболее интересных работах, вышедших в последнее время. Той же цели служил коллоквиум, организованный П. Н., но здесь действующими лицами были уже практиканты. <...> Оригинальные работы практикантов докладывались после многократной их переработки. Работы своих учеников Лебедев направлял в иностранные журналы и сам переводил их» [5].

П. В. Голубков в своих воспоминаниях приводит такие сведения, полученные, видимо, от самого Константина Александровича: за свое выпускное сочинение на предложенную П. Н. Ле-

бедевым тему «Теория магнито-оптических явлений» Леонтьев был награжден золотой медалью и рассматривался как кандидат на оставление при университете.

На фото 1912 г. К. А. Леонтьев запечатлен в научной группе П. Н. Лебедева и П. П. Лазарева. Рядом с ним – Сергей Иванович Вавилов, будущий Президент Академии наук СССР. На фото запечатлены и представители «команды» из Московского университета, приехавшие в Саратов вместе с В. Д. Зёрновым для работы на кафедре физики Саратовского университета, – Владимир Ефимович Сребницкий и Николай Павлович Неклепаев.

После ухода П. Н. Лебедева по политическим мотивам из Московского университета в 1911 г. К. А. Леонтьев последовал за ним в Московский городской народный университет

²Скорректирована подпись под фотографией из альбома «Петр Николаевич Лебедев. К 150-летию со дня рождения» (Ярославль : Издательство «РПМ», 2016. С. 185).



им. А. Л. Шанявского, где проработал преподавателем последующие 7 лет. Параллельно Леонтьев учительствовал в частной гимназии А. Д. Лебедева (1912–1914 гг.), работал ассистентом в Высшем техническом училище (1915–1916 гг.), а в 1916–1918 гг. был инструктором в «Термомеханических мастерских» (с нерасшифрованной припиской «В. Зв.») [3, л. 1 об.].

В предисловии к двум изданиям книги К. А. Леонтьева «Физические основы радиотехники» С. Н. Ржевкин отмечал:

«К. А. начал свою научную деятельность, ещё будучи студентом Московского университета, в 1911 г. Обладая прекрасными математическими способностями и получив образцовую подготовку как физик-экспериментатор, он уже в 1913 г. закончил и напечатал свою первую работу “О скачке температуры в разреженном газе”. В годы [Первой мировой] войны им разрешается трудная и ответственная задача изготовления медицинских термометров, секрет производства которых у нас был неизвестен» [6, 7, с. 4].

В 1918 и 1922 гг. вышли два издания книги К. А. Леонтьева «Температура и ее измерение» в серии книг «Наука и техника» под редакцией профессоров Н. Н. Андреева и В. К. Лебединского (М. : Издательство «Практические знания», 1918. 64 с.; М. : Кооперативное издательство научных работников, 1922. 63 с.).



Первое издание книги К. А. Леонтьева «Температура и ее измерение» (1918)
The first edition of K. A. Leontiev's book “Temperature and Its Measurement” (1918)

Профессор Саратовского университета

С 25 мая 1918 г. К. А. Леонтьев по приглашению профессора В. Д. Зёрнова начал свою деятельность в Саратовском университете – сначала ассистентом, а с 1921 г. – профессором, заведующим кафедрой физики физико-математического факультета, образованного в 1917 г. [8], и руководителем Физического института. Приехал в Саратов Леонтьев с женой Елизаветой Федоровной; здесь у них родилась дочь Татьяна, крестным которой был В. Д. Зёрнов. Вместе с Зёрновыми и другими приезжими московскими профессорами Леонтьевы жили в доме для университетской профессуры по улице М. Сергиевская, 3 (современный адрес – ул. Мичурина, 69).

В обзорном издании «Очерки по истории физики в России» К. А. Леонтьев назван учёным, который «приложил немало усилий к насаждению в нашей стране радиотехнических знаний» и «будучи хорошим экспериментатором увлекал молодежь в область физического эксперимента» [9, с. 309].

К. А. Леонтьев совмещал основную работу в университете (в том числе на аграрном факультете в 1920 г.) с преподаванием в других образовательных учреждениях Саратова – в Политехническом институте (на путевском факультете, в период его существования в 1919–1921 гг.) [10], Ветеринарном институте (1921–1922), Железнодорожном политехникуме (1923–1925), Автодорожном институте (1930) [3, л. 1 об., 20].

О научной и учебной деятельности К. А. Леонтьева в период 1918–1931 гг. рассказывается в разделе «Физические науки» книги «Саратовский университет» [11, с. 152–156], изданной в 1959 г. к 50-летию СГУ, а также в статье П. В. Голубкова [2], перепечатанной (с добавлением комментариев) в 2014 г. в журнале «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика» [12].

К. А. Леонтьев «с большой любовью и вниманием относился к вопросам преподавания», стремился улучшить как физический практикум по числу и содержанию лабораторных работ, так и лекционные демонстрации, непосредственно участвуя в постановке новой лабораторной работы или нового демонстрационного опыта. «К 1926 г. физический практикум по количеству и серьезности задач, – писал Петр Васильевич, – мог считаться одной из лучших университетских лабораторий» [2, 12]. При этом значительная часть учебной аппаратуры была изготовлена



Выпуск физико-математического факультета Саратовского университета 1921 г. Первый ряд: крайний справа – студент-математик Георгий Петрович Боев [14]; второй ряд (слева направо): 3-й – профессор и заведующий кабинетом теоретической физики Сергей Анатольевич Богуславский [15], 4-й – профессор метеорологии и заведующий кабинетом физической географии и метеорологии при кафедре физики Константин Иванович Котелов; 5-й – профессор зоологии, декан физико-математического факультета Владимир Сергеевич Елпатьевский; 6-й – ректор университета, заведующий кафедрой чистой математики, профессор Владимир Васильевич Голубев [16], 7-й – профессор кафедры чистой математики Иван Иванович Привалов; 8-й – заведующий кафедрой механики профессор Георгий Николаевич Свешников; третий ряд (слева направо): 4-й – ассистент кафедры физики Борис Иванович Котов, 6-й – ассистент кафедры физики Николай Павлович Неклепаев [17], 7-й – студент-физик Ефим Андреевич Ляхов³, 8-й – заведующий кафедрой физики профессор **Константин Александрович Леонтьев**; 4-й ряд: крайний справа – физик Евгений Александрович Гюнсбург

Graduation of the Physics and Mathematics Faculty of Saratov University in 1921. First row: far right – mathematics student Georgy Petrovich Boev [14]; second row (from left to right): 3rd – professor and head of the theoretical physics department Sergei Anatolyevich Boguslavsky [15], 4th – professor of meteorology and head of the physical geography and meteorology department at the physics department Konstantin Ivanovich Kotelov; 5th – professor of zoology, dean of the physics and mathematics faculty Vladimir Sergeevich Elpatyevsky; 6th – rector of the university, head of the pure mathematics department, professor Vladimir Vasilyevich Golubev [16], 7th – professor of the pure mathematics department Ivan Ivanovich Privalov; 8th – head of the mechanics department, professor Georgy Nikolaevich Sveshnikov; Third row (from left to right): 4th – Assistant Professor of the Physics Department Boris Ivanovich Kotov, 6th – Assistant Professor of the Physics Department Nikolai Pavlovich Neklepaev [17], 7th – Physics student Efim Andreevich Lyakhov³, 8th – Head of the Physics Department Professor Konstantin Aleksandrovich Leontyev; 4th row: far right – physicist Evgeny Aleksandrovich Günsb

сотрудниками и студентами, что подтверждаются и сохранившиеся в архивном деле приказы на командировки К. А. Леонтьева в Москву для закупок деталей для радиотехнической аппаратуры.

Константина Александровича Леонтьева отличали эрудиция в различных областях физики, оригинальность взглядов, экспериментаторский

талант. По свидетельству П. В. Голубкова, он привлекал в свою научную лабораторию студентов старших курсов, старался развивать у каждого из них самостоятельность, научить и «физически думать», и «физически работать», т. е. «сосредотачивать все внимание на физической стороне вопроса, на тщательном анализе явлений, на детальном обсуждении подходов к решению

³ Данные Нины Георгиевны Мокрушиной (Ляховой), Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва.



Преподаватели и студенты физико-технического отделения педагогического факультета. Во втором ряду (слева направо): К. А. Леонтьев (2-й), ?, Г. Н. Свешнико (4-й), В. В. Голубев (5-й), Г. П. Боев (6-й) и Н. А. Трифонов (7-й) (первая половина 1920-х гг.)

Teachers and students of the Physics and Technology Department of the Faculty of Education. In the second row (from left to right): K. A. Leontyev (2nd), ?, G. N. Sveshniko (4th), V. V. Golubev (5th), G. P. Boev (6th) and N. A. Trifonov (7th) (first half of the 1920s)

поставленной задачи, а затем – на терпеливом, внимательном, систематическом экспериментировании без боязни черновой работы и возникающих трудностей и неудач» [9, с. 153]. При работе со студентами и сотрудниками он следовал традициям научной школы П. Н. Лебедева [5, 13]), поддерживая творческую атмосферу в коллективе, проводя наряду с «рабочими беседами» кафедральные коллоквиумы по обсуждению результатов работ. Одновременно он, как и Лебедев, был требователен к качеству работ и запрещал публикацию «сырых» работ, называя их «шрифтверством».

Первый выпуск физико-математического факультета запечатлен на сохранившейся в некоторых домашних архивах фотографии 1921 г. На ней – часть педагогического коллектива факультета и выпускники – физики и математики. На стене – портрет первого декана факультета Владимира Дмитриевича Зёрнова, подвергнувшегося в тот момент кратковременному аресту.

В 1922 г. кафедра физики в ряду с другими кафедрами физико-математического факультета вошла в педагогический факультет.

К. А. Леонтьев привлек внимание специалистов к проводившимся исследованиям в Саратовском университете на IV съезде Российской ассоциации физиков (РАФ, Ленинград, сентябрь 1924 г.), выступив с обзорным докладом «Сообщение о научной деятельности Физического института Саратовского университета» [3, л. 15]. Он представил работы сотрудников в областях генерирования электромагнитных волн и их применения к изучению диэлектрических свойств веществ, акустики, физико-химического анализа.

Авторами работ являлись сам К. А. Леонтьев («К теории контактного детектора», «Экспериментальное исследование дифракции звука»), С. О. Шеремецинская («Проверка предыдущей теории [К. А. Леонтьева о возможности применения контактного детектора при измерении декрементов затухания колебательного контура]»), П. В. Голубков («О новом методе измерения диэлектрических постоянных жидкостей»), Н. А. Трифонов («Магнитная восприимчивость двойных жидких систем», «Магнитное вращение плоскости поляризации двойных жидких систем»), В. Я. Аносов («Исследование по рефрактометрии двойных жидких систем»,



СООБЩЕНИЕ О НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

К. А. Леонтьев.

Планомерная научная работа в Саратовском Институте началась с осени 1922 года. До этого времени Институту пришлось пережить очень тяжелый период почти полного распада, и работа налаживалась с очень большим трудом. Постепенно удалось подобрать ряд сотрудников, и деятельность их за указанный период (1922—24 г.г.) выражалась в следующих, законченных или достаточно продвинутых работах.

Преамбула доклада К. А. Леоньева на IV съезде РАФ
Preamble to K. A. Leonyev's report at the IV Congress of the RAP

Н. К. Воскресенская «Определение засоленности почв по электропроводности их водных вытяжек») [18]. Примечательно, что сообщения П. В. Голубкова и С. О. Шеремецинской снабжены комментариями о принадлежности К. А. Леонтьеву их основных идей! Доклад К. А. Леонтьева сопровождается краткими аннотациями представляемых работ на немецком языке.

**Конструктор первой саратовской
широковещательной станции (1925–1926)**

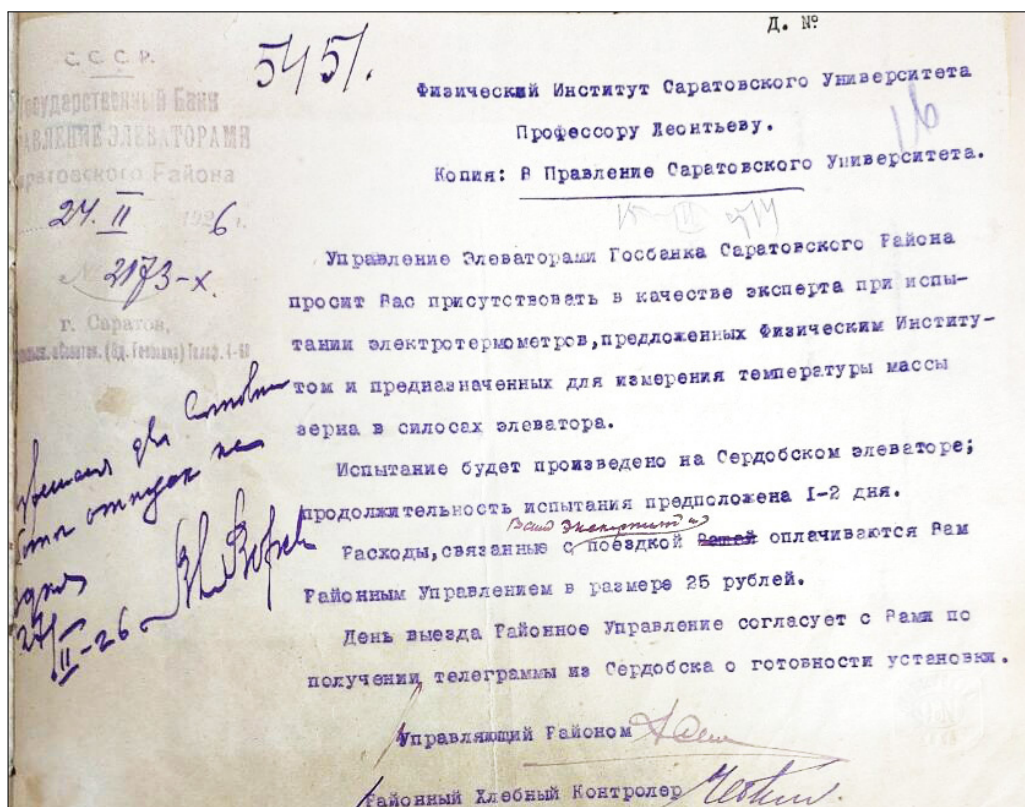
25 октября 1925 г. в газете «Саратовские известия» появилась следующая информация:

«Радио-хроника. В начале будущего года в Саратове предполагается открытие широковещательной радиостанции. В виду этого в нашей губернии несомненно повысится интерес к радиолюбитель-



Кафедра физики, 1924 г. Во втором ряду (слева направо): 5-й (в центре) – К. А. Леонтьев, 6-й – Н. А. Трифонов, 7-й – П. В. Голубков (фото В. И. Калинина)

Department of Physics, 1924. In the second row (from left to right): 5th (in the center) – K. A. Leontiev, 6th – N. A. Trifonov, 7th – P. V. Golubkov (photo by V. I. Kalinin)

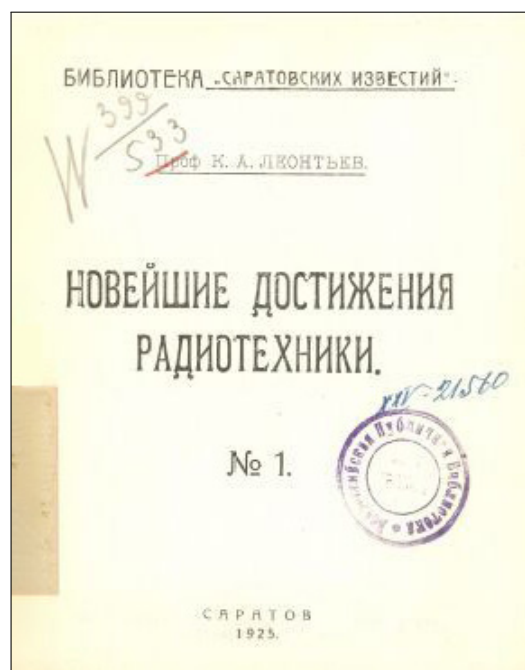


Приглашение К. А. Леонтьева на испытания электротермометров, разработанных Физическим институтом СГУ [3, л. 16]

Invitation to K. A. Leontiev to test electrothermometers developed by the Saratov State University Physics Institute [3, sh. 16]

ству. Учитывая это обстоятельство, физический институт [Саратовского университета] организует цикл лекций по радиотехнике. Лекции имеют целью изложить в популярной форме, доступной широким массам, научные основы радиотехники, а также познакомить слушателей с расчетом, конструкцией и простейшими способами изготовления приемников и их частей».

И в том же 1925 г. в Саратове тиражом 10000(!) экземпляров издается в качестве приложения к газете «Саратовские известия» брошюра К. А. Леонтьева «Новейшие достижения радиотехники» [19]. Извещение о продаже книги (номинал – 15 коп., продажная стоимость – 10 коп.) можно увидеть, например, в номере названной газеты за 30 сентября 1925 г. Цель издания – популярно объяснить принцип радиосвязи, обусловленной распространением электромагнитных волн. «Их не видно глазом, их не слышно ухом, – писал в небольшом вступлении к брошюре К. А. Леонтьев, – но они существуют и их можно уловить и превратить в звук. Как это делается? На это вопрос мы и попытаемся ответить в этой маленькой книжке» [19, с. 5].



Первая страница обложки популярной брошюры К. А. Леонтьева (1925)

The front cover of K. A. Leontiev's popular brochure (1925)



Так началась горячо поддержанная энтузиастами, членами Саратовского отделения Общества друзей радио (ОДР)⁴, эпопея по созданию первой широкоэвещательной радиостанции в Саратове.

Практическая реализация проекта требовала наличия соответствующего материального обеспечения. К. А. Леонтьев занимается поисками радиотехнических комплектующих. Еще в мае 1925 г. университет направляет его на неделю в Москву, в Электротехнический трест заводов слабого тока⁵ и Общество «Радиопередача»⁶, ходатайствуя об оказании содействия по приобретению радио-принадлежностей (с проживанием в общежитии ЦЕКУБУ⁷) [3, л. 10]. В сентябре 1925 г. К. А. Леонтьев опять едет в столицу «для приобретения лабораторных и радио-принадлежностей» [3, л. 4].

Сообщения о ходе работ по созданию радиостанции мощностью 50 ватт неоднократно появлялись на страницах газеты «Саратовские известия», а также в журнале «Радио всем» [1]. В течение 1926 г. проводилось несколько испытаний радиостанции; места ее расположения менялись, несколько изменялась и длина волны ее работы. Из ряда городов (Аткарск, Кузнецк, Балашов) были получены вполне удовлетворительные оценки слышимости.

Днем рождения первой саратовской широкоэвещательной радиостанции стало 8 ноября 1926 г. [1]. Местом ее расположения назывался Саратовский ипподром, в 1926 г. находившийся вблизи железнодорожного вокзала. Наряду с К. А. Леонтьевым основополагающий вклад в конструирование станции внесли инженер Виктор Николаевич Харьков, член Губсовета Саратовского отделения ОДР, и инженер Н. А. Семенов [11, с. 158].

История создания первой радиостанции в Саратове изложена в статье Александра Николаевича Стиковского, секретаря Саратовского отделения ОДР, в журнале «Радио всем» [20].



К. А. Леонтьев и В. Н. Харьков (коллаж, 1926) [20]

K. A. Leontiev and V. N. Kharkov (collage, 1926) [20]

Популяризатор науки.

Автор и переводчик учебников

Профессора и преподаватели Саратовского университета в 1920-х гг. играли важную роль в естественнонаучном просвещении жителей Саратова. Многие из них являлись членами созданного в 1895 г. Саратовского общества естествоиспытателей и любителей естествознания (СОЕ). В 1913–1921 гг. председателем совета СОЕ был Владимир Дмитриевич Зёрнов, создатель кафедры физики и Физического института. В 1921–1930 гг. в СОЕ состоял Константин Александрович Леонтьев, занимая посты товарища председателя общества, члена совета СОЕ, руководителя физико-математического отделения [21, с. 274–276]. Всего за 1913–1930 гг. физики и математики на заседаниях СОЕ прочитали более 40 докладов различной тематики [21, с. 303–316].

К. А. Леонтьев представлял доклады по различным разделам физики, затрагивая и радиотехнические вопросы: «Явления Беккереля в спектре», «О работе Беккереля», «О кристаллических детекторах» (1919), «Оптика Ньютона» (1927),

⁴Общество друзей радио (ОДР) – первая Всесоюзная организация радиолюбителей, созданная 3 марта 1924 г. Первым параграфом Устава Общества (1926) определялись его цели: «Общество Друзей Радио СССР организуется для пропаганды идей радиодвижения, популяризации радиотехнических знаний среди широких трудящихся масс Союза ССР, объединения и направления радиолюбительского движения в интересах Союза ССР, участия в радиофикации и использования радио как могучего орудия культурного подъема народов Союза ССР». Общество действовало до 1932 г. Восстановлено 3 марта 2017 г.

⁵Заводами слабого тока в то время называли предприятия, производившие технику связи (телеграфную, телефонную, радиотехнику, электровакуумные приборы и комплектующие к ним).

⁶«Радиопередача» (до 1 декабря 1924 г. – «Радио для всех») – акционерное общество, осуществлявшее радиовещание (радиокомпания) в СССР в 1924–1928 гг.

⁷ЦЕКУБУ – Центральная комиссия по улучшению быта ученых при СНК РСФСР.



«Электрическое измерение температуры в силовых элеваторах» (1928), «Метод централизованного измерения температуры и его применение в хлебом деле» (1930). Радиофизической тематике были посвящены доклады П. В. Голубкова, В. И. Калинина, З. И. Митягиной, В. Л. Патрушева.

Творческий характер личности К. А. Леонтьева проявлялся также в написанных им книгах и переводах книг ведущих зарубежных физиков. Работая еще в Москве, он выпустил переводы книг Р. Содди и П. Филлипса, а в Саратове подготовил переводы книг Р. Поля по механике и акустике и авторского коллектива по физике упругих и жидких тел:

Филлипс П. Излучение (Radiation) / пер. с англ. К. А. Леонтьева ; под ред. А. К. Тимирязева. М. : Книгоиздательство «Печатник», [1913]. 108 с. (Типография «Земля»)⁸.

Филлипс П. Излучение (Radiation) / пер. с англ. К. А. Леонтьева ; под ред. А. К. Тимирязева. М. : Книгоиздательство «Печатник», 1922. 108 с.

(Типография М. Г. С. Н. Х. 3000 экз.; повторена ошибка в написании имени).

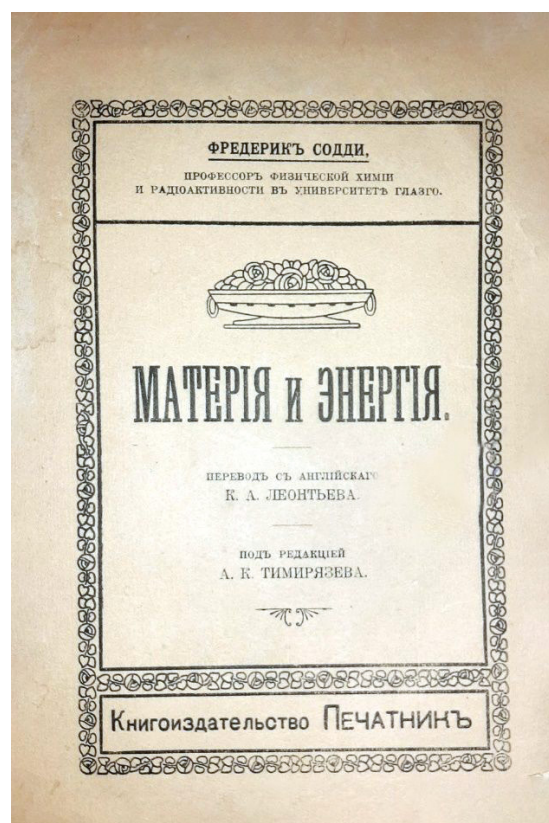
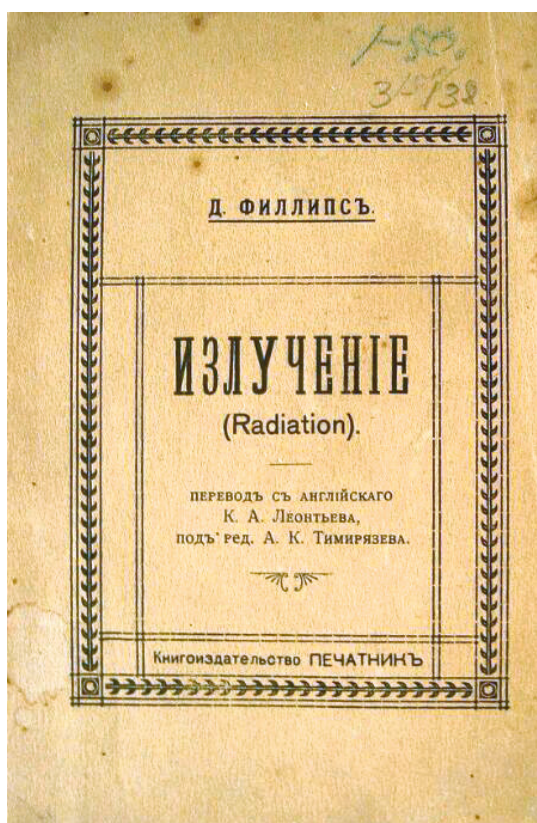
Содди Ф. Материя и энергия / пер. с англ. К. А. Леонтьева ; под ред. А. К. Тимирязева. М. : Печатник, [1913]. 223 с.

Поль Р. В. Введение в механику и акустику. 2-е изд. / пер. с нем. К. А. Леонтьева. М. ; Л. : Гос. техн.-теоретич. изд-во, 1933. 275 с.

Пешль Т., Эвальд П., Прандтль Л. Физика упругих и жидких тел / пер. с нем. проф. К. А. Леонтьева. М. ; Л. : Гос. техн.-теорет. изд-во, 1933. 325 с. (Фабрика книги «Красный пролетарий»).

Организатор заседания VI съезда РАФ в Саратове

В 1928 г. особое место в жизни К. А. Леонтьева заняла подготовка к проведению в Саратове заключительного заседания VI съезда Российской ассоциации физиков (РАФ). Константин Александрович был включен в состав Центрального организационного комитета съез-



Книги, переведенные К. А. Леонтьевым
Books translated by K. A. Leontiev

⁸На обложке книги в инициалах автора (П. Филлипс) допущена неточность: стоит Д вместо П.



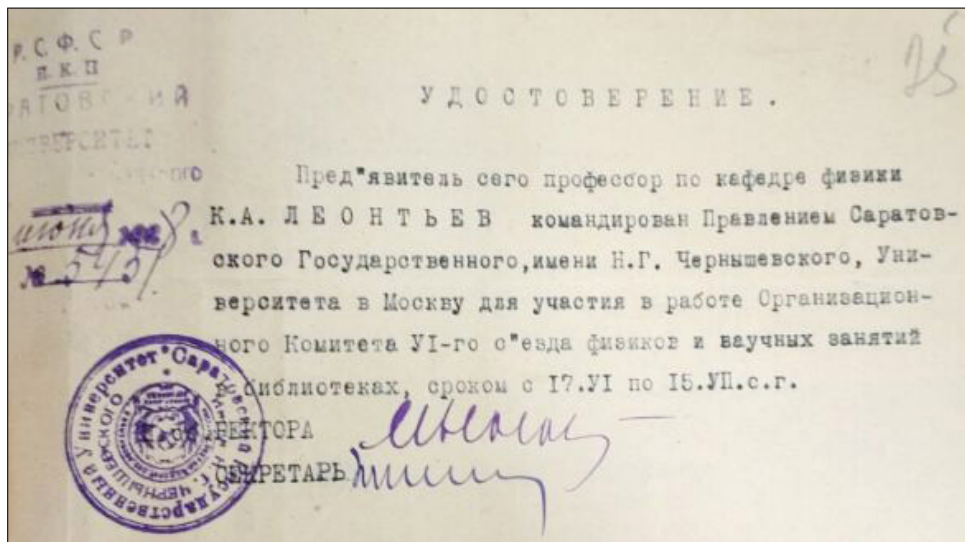
да и участвовал в его заседаниях в Москве [3, л. 14, 15].

Участники съезда прибыли в Саратов рано утром 15 августа 1928 г. на пароходе «Алексей Рыков». Съезд стартовал в Москве, а затем продолжил в «плавучем режиме» свои заседания в волжских университетских городах – Н. Новгороде, Казани и Саратове [22, 23]. К встрече многочисленных гостей (до 200 чел.) серьезно готовились и местные органы власти. Был создан Нижне-Волжский краевой организационный комитет⁹. В газете «Поволжская правда» своевременно была опубликована информация об участниках и программе заседания съезда, месте его проведения (III корпус СГУ). В день проведения заседания, 15 августа, было напечатано приветствие съезду, подписанное председателем исполкома Нижне-Волжского краевого совета М. И. Хлопьянкиным, председателем краевого бюро секции (профсоюза) научных работников проф. М. Н. Райским, руководителями саратовских вузов – проф. С. З. Каценбогеном (Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского), Г. И. Бройдо (Саратовский областной коммунистический университет), проф. Б. Х. Медведевым (Саратовский институт сельского хозяйства и мелиорации), проф. А. Р. Евграфовым (Ветеринарный институт), а также и председателем местного отде-

ления Центрального организационного комитета съезда физиков проф. К. А. Леонтьевым.

Перед заседанием гости посетили учебно-научные лаборатории Физического института. Заседание съезда в Большой физической аудитории III корпуса Саратовского университета открыл академик А. Ф. Иоффе. Приветственные слова произнесли: проф. С. З. Каценбоген (на немецком языке), проф. Г. Н. Свешников (на французском языке), проф. К. А. Леонтьев. С научными докладами выступили зарубежные ученые – будущий нобелевский лауреат Макс Борн, изложивший понятия только что возникшей матричной теории квантовой механики, Филипп Франк, говоривший об интерпретации терминов квантовой механики, и Антон Эдуард ван Аркель, рассказавший об исследованиях рассеивающих свойств кристаллов. Общение с зарубежными участниками поддерживали А. Ф. Иоффе и студенты старших курсов физико-математического факультета МГУ, в числе которых был Дмитрий Зёрнов, сын основателя Физического института СГУ. После заседания участники съезда из Германии совершили поездку в Республику немцев Поволжья.

Проведение съезда РАФ в Саратове стало своеобразным актом признания организаторских, учебных и научных заслуг не только самого К. А. Леонтьева, но и всех представляемых



Командировочное удостоверение К. А. Леонтьева как члена Организационного комитета VI съезда Российской ассоциации физиков [3, л. 25]

Travel certificate of K. A. Leontiev as a member of the Organizing Committee of the VI Congress of the Russian Association of Physicists [3, sh. 25]

⁹Нижне-Волжский край – административная единица РСФСР, существовавшая с 21 мая 1928 года по 10 января 1934 года. В 1928–1931 гг. столицей края был Саратов, с 10 января 1932 г. – Сталинград.



в его лице саратовских физиков. Одобрительные отзывы об университетских лабораториях, съездовских заседаниях, заслушанных докладах, научных дискуссиях на пароходе во время плавания по Волге нашли отражение в отечественных и зарубежных научных журналах, в письмах участников съезда к его организаторам – председателю съезда академику А. Ф. Иоффе и секретарю съезда С. И. Вавилову.

Предыстория VI съезда РАФ и хронология дня 15 августа 1928 г. подробно описаны в [22–24].

Последние годы жизни

О направлениях научно-исследовательской деятельности К. А. Леонтьева в конце 1920-х – начале 1930-х гг. можно узнать из его архивного дела [3]. 24 июля 1928 г. он обращается в Правление университета с просьбой «выдать удостоверение на перевод через Госбанк 20 р. в Германию фирме “Photo-Felisch” для выписки необходимых для работы фотоматериалов» [3, л. 26]. На период с 1 по 6 сентября 1928 г. он выезжает в Москву «для переговоров с академиком Лазаревым о постановке в Нижне-Волжском крае магнитных исследований» [3, л. 27, 28].

В октябре 1930 г. К. А. Леонтьев едет в Ленинградский физико-технический институт «для доклада о работе кафедры физики» [3, л. 34]. Имеются сведения об участии К. А. Леонтьева в Первой Всесоюзной акустической конференции в Ленинграде 27–30 сентября 1931 г., организованной руководителем акустической лаборатории Физико-технического института Н. Н. Андреевым (академик Николай Николаевич Андреев в 1919 г. работал на кафедре физики Саратовского университета [15]) [3, л. 44, 45].

В 1931 г. К. А. Леонтьев решает оставить работу в Саратовском университете и переехать в Ленинград. В заявлении от 31 июля 1931 г., адресованном тогдашнему директору СГУ, он пишет:

«Проведенная мною в текущем году работа по одному вопросу военной техники, порученная мне Ленинградским государственным физико-техническим институтом, дала настолько благоприятные результаты, что физико-техническое управление Р.К.К.А. наметило ряд работ в той же области. Ввиду невозможности проведения этих работ вне специально оборудованной лаборатории, Г.Ф.Т.И. предложил мне перейти мне в его штат для ведения их в Институте.



К. А. Леонтьев с женой, конец 1920-х гг.
(фото В. И. Калинина)

K. A. Leontiev with his wife, late 1920s
(photo by V. I. Kalinin)



К. А. Леонтьев, конец 1920-х гг.
(фото В. И. Калинина)

K. A. Leontiev, late 1920s
(photo by V. I. Kalinin)



Это не первый случай, когда моя работа получает одобрение очень авторитетных лиц и учреждений. С другой стороны, моя работа в качестве профессора и заведующего кафедрой Педфака неоднократно подвергалась очень резкой и неблагоприятной оценке как со стороны деканата Педфака, так и связанных с ним организаций. <...>

Чувствуя всю ненормальность обрисованного выше положения и желая посвятить себя всецело производительной работе на пользу промышленности и обороны страны, прошу освободить меня от преподавания и предоставить мне возможность использовать свой опыт и знания там, где они действительно могут быть использованы с наибольшим полезным эффектом» [3, л. 42].

Одновременно в университет приходит телеграмма из Наркомпроса, в которой со ссылкой на распоряжение наркома просвещения А. С. Бубнова предлагалось (именно так!) «откомандировать на работу в Ленинграде профессора Леонтьева» (СГУ и ФТИ находились в системе Наркомпроса).

Откровенная «мягкость» формулировки позволила, видимо, директору СГУ (с учетом имевшегося у него негативного опыта общения с московскими профессорами [14]) наложить на это заявление «аккуратную» резолюцию: «Откомандировать зав. каф. физики невозможно. Необходимо и возможно, учитывая организацию нового физического отделения, создание более

благоприятной обстановки для научно-исследовательской работы. 26/VI 31 г.»

С 11 сентября 1931 г., после восстановления в университете физико-математического факультета, К. А. Леонтьев был назначен заведующим кафедрой *опытной физики* (преемницей университетской кафедры физики), а его ученик П. В. Голубков – доцентом этой кафедры [3, л. 47]. Но уже 30 декабря 1931 г. Константин Александрович вынужден был написать заявление с просьбой об освобождении его от занятий до 1 февраля 1932 г. по состоянию здоровья [3, л. 46]. Заявление сопровождалось заключением о необходимости немедленного лечения; оно было выдано поликлиникой медицинской секции Саратовского Дома ученых и подписано крупными саратовскими медиками – терапевтом профессором П. Н. Николаевым и психиатром профессором М. П. Кутаниным. На лечение К. А. Леонтьев уехал в Москву (проездные билеты были получены благодаря хлопотам университета). Через три месяца, 4 апреля 1932 г., он скончался...

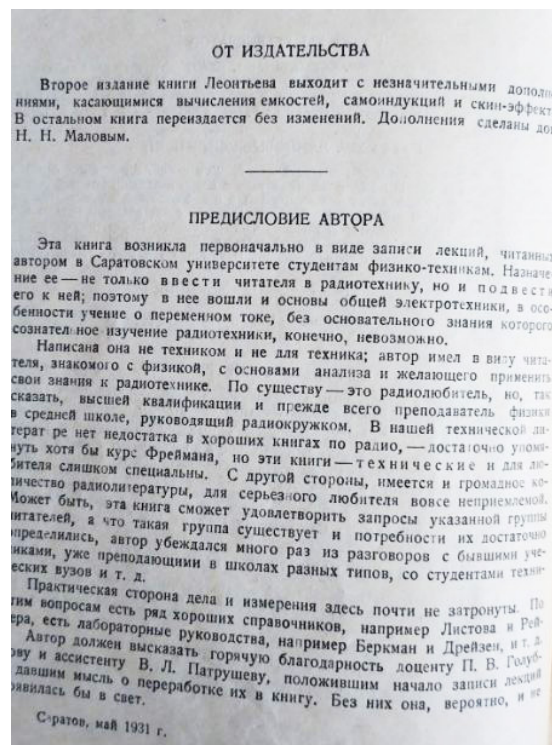
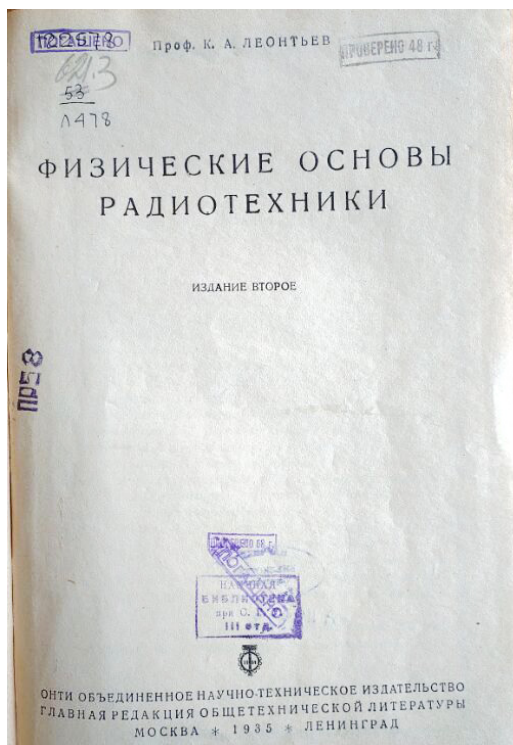
Заключение

Два ученика К. А. Леонтьев – Венедикт Иванович Калинин и Петр Васильевич Голубков – стали создателями двух ветвей научной



Сотрудники кафедры опытной физики физико-математического факультета СГУ
П. В. Голубков, ?, В. И. Калинин, Н. А. Трифонов, В. Л. Патрушев (1932)

Staff of the Department of Experimental Physics of the Faculty of Physics and Mathematics
of Saratov State University P. V. Golubkov, ?, V. I. Kalinin, N. A. Trifonov, V. L. Patrushev (1932)



Второе издание книги К. А. Леонтьева «Основы радиотехники» (1935) с предисловием к первому изданию, написанным в мае 1931 г.
The second edition of K. A. Leontiev's book "Fundamentals of Radio Engineering" (1935) with a preface to the first edition, written in May 1931

радиофизической школы в Саратовском государственном университете. Много сил он приложил для развития теоретической и лабораторной базы кафедры физики СГУ. Два издания выдержал его оригинальный учебник «Физические основы радиотехники» [6, 7]. Для проведения методических и научных консультаций он выезжал в другие города [3, л. 41].

Но особенно К. А. Леонтьева привлекала научно-техническая деятельность, и именно как ученый он был приглашен в последний год своей, как оказалось, короткой жизни на работу в ведущее научно-исследовательское учреждение страны – Ленинградский государственный физико-технический институт. Леонтьев организовал проведение в Саратове заключительного заседания VI съезда Российской ассоциации физиков (1928), в котором приняли участие физики из различных городов Советского Союза и до 30 зарубежных ученых.

При непосредственном участии К. А. Леонтьева в Саратове были решены важные технические проблемы по организации радиовещания, акустической пеленгации, ряд прикладных задач, в частности по удаленному измерению

температуры массы зерна в силосах элеваторах с помощью электротермометров, разработанных Физическим институтом.

К. А. Леонтьев сыграл большую просветительскую роль, занимаясь переводами на русский язык книг, написанных видными зарубежными учеными, и выступая с научно-популярными докладами в стенах университета как многолетний член и руководитель физико-математического отделения Саратовского общества естествоиспытателей и любителей естествознания.

Константин Александрович Леонтьев оставил яркое впечатление о своей деятельности в СГУ.

Список литературы

1. Слушайте! Слушайте! Слушайте! Хроника развития радио в Саратовской губернии: 1924–1930 гг. / сост. Т. А. Пашкина, Д. П. Петров. Саратов : КИЦ «Саратовфильм» – «Добродей», 2021. 456 с.
2. Голубков П. В. Константин Александрович Леонтьев // Успехи физических наук. 1932. Т. XII, вып. 4. С. 501–505.
3. Архив Саратовского университета. Личное дело Леонтьева Константина Александровича. 50 л.



4. Научная переписка П. Н. Лебедева. М. : Наука, 1990. 500 с. (Научное наследство. Т. 15).
5. Лёвшин В. Л. Жизнь и научная деятельность П. Н. Лебедева // УФН. 1967. Т. 91, вып. 2. С. 331–339. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0091.196702h.0331>
6. Леонтьев К. А. Физические основы радиотехники. М. ; Л. : Государственное технико-теоретическое издательство, 1932. 163 с.
7. Леонтьев К. А. Физические основы радиотехники. 2-е изд. М. ; Л. : ОНТИ. Главная редакция общетехнической литературы, 1935. 167 с.
8. Аникин В. М. «Вести в действие до обнародования Правительствующим Сенатом» (К истории учреждения физико-математического факультета Саратовского университета) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2018. Т. 18, № 2. С. 149–157. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-2-149-157>
9. Очерки по истории физики в России : пособие для студентов и учителей / под ред. проф. А. К. Тимирязева. М. : Учпедгиз, 1949. 343 с.
10. Аникин В. М., Самохвалова Н. В. Феномен А. А. Лаговского // Очерки истории физико-математического образования в Саратовском университете / под общ. ред. В. М. Аникина. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2025. Вып. 7. С. 9–45.
11. Саратовский университет. 1909–1959. Саратов : Издательство Саратовского университета, 1959. 292 с.
12. Голубков П. В. Константин Александрович Леонтьев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 65–68. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2014-14-1-65-68>
13. Аникин В. М. Школа Петра Николаевича Лебедева: принципы научной и образовательной деятельности // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : физика. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 188–201. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-1-188-201>, EDN: LXZGTT
14. 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://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-3-306-322>, EDN: ZZBMAX
15. Аникин В. М. Профессор Саратовского и Московского университетов Сергей Анатольевич Богуславский (1883–1923) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2024. Т. 24, вып. 2. С. 180–193. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-2-180-193>, EDN: UXAVTF
16. 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>, EDN: REJCGJ
17. Зёрнов В. Д. Записки русского интеллигента / публ., вступ. ст., коммент. и указ. имён В. А. Соломонова ; под общ. ред. А. Е. Иванова. М. : Индик, 2005. 398 с.
18. Леонтьев К. А. Сообщение о научной деятельности Физического института Саратовского университета // Журнал русского физико-химического общества. Часть физическая. 1925. Т. LVII, вып. 1–2, С. 43–50.
19. Леонтьев К. А. Новейшие достижения радиотехники. Саратов : [Сарсовпартиздат], 1925. 62 с. (Библиотека «Саратовских известий», № 1).
20. Стиксов А. Н. Широковещательная радиотелефонная станция Саратовской губернской организации ОДР // Радио всем. 1926, № 6. С. 5. URL: <https://archive.radio.ru/web/1926-rv/05/v006> (дата обращения: 12.03.2026).
21. Пантеева Н. М. У истоков саратовского естественно-исторического краеведения. Саратов : Саратовский областной музей краеведения, 2024. 352 с.
22. Аникин В. М. «Волжский» съезд как зеркало развития физических наук в 1920-е годы. К 100-летию основания российской ассоциации физиков // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90, № 1. С. 81–88. <https://doi.org/10.31857/S0869587320010028>
23. Аникин В. М., Чурочкина С. В., Чурочкин Д. В. «Ах, что такое движется там по реке...». К 95-летию VI съезда Российской ассоциации физиков // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2023. Т. 23, вып. 3. С. 265–280. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-3-265-280>
24. Аникин В. М. 15 августа 1928 г. в истории Саратовского университета // Очерки истории физико-математического образования в Саратовском университете / под общ. ред. В. М. Аникина. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2024. Вып. 6. С. 64–100. EDN: NBSTNO

References

1. *Slushayte! Slushayte! Slushayte! Khronika razvitiya radio v Saratovskoy gubernii: 1924–1930 gg.* [Pashkina T. A., Petrov D. P., comps. Listen! Listen! Listen! Chronicle of the development of radio in the Saratov province: 1924–1930]. Saratov, KITs “Saratovtelevfilm” – “Dobrodeya”, 2021. 456 p. (in Russian).
2. Golubkov P. V. Konstantin A. Leontiev. *Usp. Phys. Nauk*, 1932, iss. 4, pp. 501–505 (in Russian). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0012.193204g.0501>
3. Saratov University Archives. Personal file of Konstantin Aleksandrovich Leontyev. 50 sheets (in Russian).
4. *Nauchnaya perepiska P. N. Lebedeva* [Scientific correspondence of P. N. Lebedev. Scientific heritage. Vol. 15]. Moscow, Nauka, 1990. 500 p. (in Russian).
5. Levshin V. L. Life and scientific activity of Petr Nikolaevich Lebedev. *Sov. Phys. Usp.*, 1967, vol. 10, pp. 102–107. <https://doi.org/10.1070/PU1967v010n01ABEH003202>
6. Leontiev K. A. *Fizicheskie osnovy radiotekhniki* [Physical foundations of radio engineering]. Moscow, Leningrad, Gosudarstvennoe tekhniko-teoreticheskoe izdatel'stvo, 1932. 163 p. (in Russian).
7. Leontiev K. A. *Fizicheskie osnovy radiotekhniki* [Physical foundations of radio engineering]. Moscow, Leningrad, ONTI, Glavnaya redaktsiya obshchetechnicheskoy literatury, 1935. 167 p. (in Russian).



8. Anikin V. M. "Enter into Action before Declaration by Governing Senate" (On the History of the Establishment of the Faculty of Physics and Mathematics at Saratov State University). *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 149–157 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-2-149-157>
9. *Ocherki po istorii fiziki v Rossii: Posobie dlya studentov i uchiteley* [Prof. Timiryazev A. K., ed. Essays on the history of Physics in Russia: A Manual for students and teachers]. Moscow, Uchpedgiz, 1949. 343 p. (in Russian).
10. Anikin V. M., Samokhvalova N. V. The Phenomenon of A. A. Lagovsky. *Ocherki istorii fiziko-matematicheskogo obrazovaniya v Saratovskom universitete* [Anikin V. M., total ed. Essays on the History of Physics and Mathematics Education at the Saratov University]. Saratov, Saratov State University Publ., 2025, iss. 7, pp. 9–45 (in Russian).
11. *Saratov University. 1909–1959*. Saratov, Saratov University Publ., 1959. 292 p. (in Russian)
12. Golubkov P. V. Konstantin A. Leontiev. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2014, vol. 14, iss. 1, pp. 65–68 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2014-14-1-65-68>
13. Anikin V. M. Peter N. lebedev's school: Principles of scientific and educational activities. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 188–201 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-1-188-201>, EDN: LXZGTT
14. 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
15. Anikin V. M. Professor at Saratov and Moscow Universities Sergei A. Boguslavsky (1883–1923). *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 2, pp. 180–193 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-2-180-193>, EDN: UXABTF
16. 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>, EDN: REJCGJ
17. Zernov V. D. *Zapiski russkogo intelligenta* [Solomonov V. A., publication, introduction, commentary and index, Ivanov A. E., total ed. Notes of a Russian Intelligentsia. J. Moscow, Indrik, 2005. 398 p. (in Russian).
18. Leontiev K. A. Report on the scientific activities of the Physical Institute of Saratov University. *Journal of the Russian Physico-Chemical Society. Part of Phys.*, 1925, vol. LVII, iss. 1–2, pp. 43–50 (in Russian).
19. Leontiev K. A. *Novejshie dostizheniya radiotekhniki* [The latest achievements in radio engineering] (Library of "Saratovskie Izvestia", no. 1). Saratov, Sarsovpartizdat, 1925. 62 p. (in Russian).
20. Stiksov A. N. Broadcasting radiotelephone station of the Saratov provincial organization of the SFR. *Radio llya vseh* [Radio to Everyone], 1926, no. 6, pp. 5. Available at: <https://archive.radio.ru/web/1926-rv/05/v006> (accessed March 12, 2026) (in Russian).
21. Panteeva N. M. *U istokov saratovskogo estestvenno-istoricheskogo kraevedeniya* [At the origins of Saratov natural history and local history]. Saratov, Saratov Regional Museum of Local History Publ., 2024. 352 p. (in Russian).
22. Anikin V. M. The Volga Congress as a mirror of the development of the physical sciences in the 1920s. On the 100th Anniversary of the founding of the Russian Physicists' Association. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 1, pp. 81–88 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0869587320010028>, EDN: AVNUXN
23. Anikin V. M., Churochkin D. V., Churochkina S. V. "Ah, what is moving there along the river...". To the 95th anniversary of the VI Congress of the Russian Association of Physicists. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 265–280 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-3-265-280>, EDN: OLKYAO
24. Anikin V. M. August 15, 1928 in the history of Saratov University. *Ocherki istorii fiziko-matematicheskogo obrazovaniya v Saratovskom universitete* [Anikin V. M., total ed. Essays on the History of Physics and Mathematics Education at the Saratov University]. Saratov, Saratov State University Publ., 2024, iss. 6, pp. 64–100 (in Russian). EDN: NBSTNO

Поступила в редакцию 20.04.2026; одобрена после рецензирования 28.04.2026; принята к публикации 29.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 20.04.2026; approved after reviewing 28.04.2026; accepted for publication 29.04.2026; published 30.06.2026

PERSONALIA

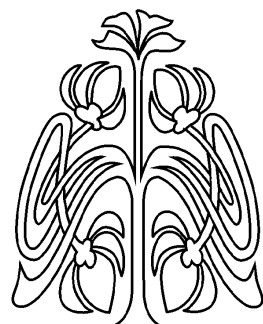
Биографические бифуркации профессора Андрея Всеволодовича Стальмахова. К 70-летию со дня рождения



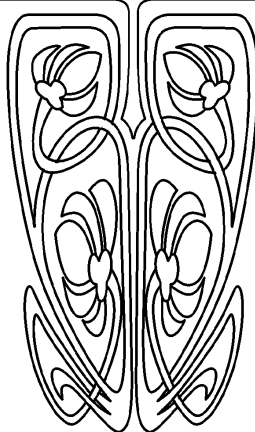
24 апреля 2026 г. исполнилось 70 лет со дня рождения доктора физико-математических наук, профессора Андрея Всеволодовича Стальмахова.

Фамилия «Стальмахов» хорошо известна в Саратовском университете. Всеволод Семенович Стальмахов (1928–1991), доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, входил в когорту корифеев Саратовской научной школы радиоэлектроники, руководил уникальным научно-образовательным коллективом – кафедрой общей физики, ровесницей университета, состав которой в лучшие годы достигал 70 человек. Приняв в 1970 г. кафедру от выпускника университета 1923 г. П. В. Голубкова, он на блестящем методическом уровне поддерживал ее деятельность в годы всеобщего признания значимости физической науки, сам демонстрировал на лекциях разнообразный арсенал физических экспериментов. Талантливый ученый и педагог, Всеволод Семенович проявил себя и умелым организатором в масштабах университета и радиоэлектронной отрасли страны. В течение 10 лет он занимал в СГУ должность проректора по научной работе, был членом проблемного совета «Физическая электроника» Академии наук СССР.

Интересна профессиональная линия Стальмаховых. Мать Всеволода Семеновича, Евгения Эрнестовна, преподавала физику в средней школе. Его сестра, Лариса Семеновна, в 1967 г. защитила диссертацию «Исследование основных параметров линий первого и второго порядка в спектрах комбинационного рассеяния ряда жидкостей (абсолютные интенсивности, ширина, степени деполяризации, температурная зависимость)», многие годы проработала доцентом на кафедре оптики СГУ. Жена Всеволода Семеновича, Изабелла Петровна, окончила



ПРИЛОЖЕНИЕ





в 1957 г. физический факультет СГУ по специальности «радиоэлектроника» (первый набор на физический факультет II), преподавала физику в Саратовском политехническом институте.

Такая насыщенная физикой семейная аура не могла не сказаться на послешкольном выборе Андреем Стальмаховым жизненного пути. Но уже будучи студентом физического факультета СГУ он выбрал свое направление. В 1978 г. с отличием окончил кафедру физики твердого тела, а затем поступил в аспирантуру Института радиотехники электроники (ИРЭ) АН СССР, ушел в академическую науку, работал в Саратовском филиале ИРЭ. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию «Магнитостатические волны в одиночных и связанных ферритовых слоях», а в 1992 г. – диссертацию «Распространение пучков магнитостатических волн в тонкопленочных структурах» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 «Физика полупроводников», став, таким образом, одним из первых докторов наук в современной истории России. Обе диссертации защищались в историческом здании физического института МГУ на Моховой.

К этому времени у Андрея Всеволодовича сложился крепкий семейный «тыл», причем (получается, что по традиции) его жена, сын (1978 г. рождения), кандидат физико-математических наук, и дочь (1987 г. рождения) имеют высшее физическое образование, что позволяет сегодня говорить о «семейной физико-технической школе Стальмаховых».

Приобретенный статус и профессиональная поддержка жены позволили Андрею Всеволодовичу успешно пройти первую жизненную «точку бифуркации» в 1990-е годы, когда сократилось бюджетное финансирование научных исследований. В 1993 г. он резко сменил место и направление работы, перейдя в Саратовский юридический институт МВД, созданный для подготовки экспертов-криминалистов. Имея за спиной огромный багаж физико-математических знаний и экспериментальных навыков, он уверенно вошел в новую сферу деятельности, освоил премудрости конструктивных особенностей различных типов и моделей оружия, разнообразных видов экспертной работы, в частности судебной баллистики, стал профессором кафедры трасологии и баллистики, начальником кафедры криминалистического оружиеведения, заместителем директора института по научной работе. Этап этой деятельности А. В. Стальмахова отражают подготовленные им учебники «Судебная баллистика и судебно-баллистическая экспертиза» (1998), «Холодное и метательное оружие: Криминалистическая экспертиза» (2000) по специальностям подготовки «Судебная экспертиза», «Криминалистическая экспертиза». В 2004–2011 гг. он был главным редактором федерального научно-практического журнала «Судебная экспертиза».

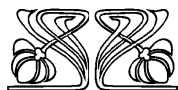
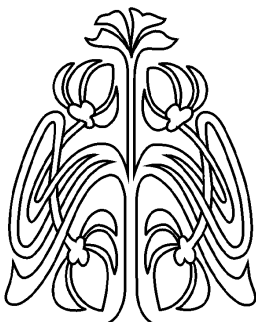
В 2013 г. полковник милиции А. В. Стальмахов пережил вторую серьезную жизненную бифуркацию: Юридический институт МВД в Саратове был закрыт. В этот момент ректор СГУ Л. Ю. Коссович пригласил Андрея Всеволодовича на пост проректора по научно-исследовательской работе. Со структурой деятельности и ответственности проректора по данному направлению Стальмахов был знаком по предыдущей работе, но, конечно, неизмеримо выросли масштабы задач, тем более, что университет с 2010 г. имел статус Национального исследовательского. Постепенно имя А. В. Стальмахова вернулось в научную печать в публикациях, связанных с исследованием магнитостатических волн.

В начале 2016 г. произошла третья бифуркация в рабочей биографии А. В. Стальмахова: в должности проректора он стал отвечать за работу административных служб СГУ, без которых университет не сможет прожить и дня. Это и отдел кадров, и юридический отдел, и отдел документационного обеспечения (корреспонденция в разных видах), и организационно-аналитическая работа, и архив... Андрей Всеволодович внес в работу этих подразделений немало усовершенствований: например, вскрыл нюансы, связанные с корректным оформлением важных документов, инициировал обустройство архива – кладези бесценных исторических сведений об университете – и мн. др. Здесь сыграли роль такие его личные качества (присущие, впрочем, и его отцу), как аккуратное обращение с документами и фактами, добросовестность при исполнении любого дела, стремление сделать все на высшем уровне.

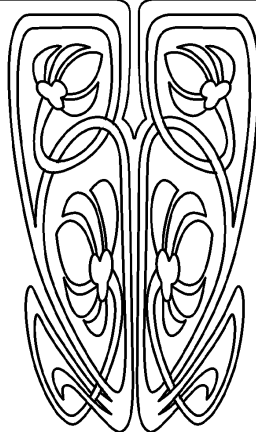
И вот новый поворот: А. В. Стальмахов сосредотачивает свою работу на кафедре материаловедения, технологии и управления качеством Института физики СГУ.

Поздравляем Андрея Всеволодовича с юбилейной датой, желаем здоровья и новых успехов в творческой деятельности!

*Редакционная коллегия журнала
«Известия Саратовского университета.
Новая серия. Серия: Физика»*



ПОДПИСКА



Подписка на печатную версию

Подписной индекс издания 36015.
Оформить подписку на печатную версию
можно в Интернет-каталоге
ГК «Урал-Пресс» (ural-press.ru).
Журнал выходит 4 раза в год.
Цена свободная

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

Адрес Издательства

Саратовского университета (редакции):

410012, Саратов, Астраханская, 83

Тел.: +7(845-2) 51-29-94, 51-45-49, 52-26-89

Факс: +7(845-2) 27-85-29

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

Адрес редколлегии серии:

410012, Саратов, 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>



ISSN 1817-3020 (Print). ISSN 2542-193X (Online)
Известия Саратовского университета. Новая серия.
Серия: Физика. 2026. Том 26, выпуск 2

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

