

**Ассоциация студентов-физиков и молодых учёных России**  
**Башкирский государственный университет**  
**Уральский федеральный университет**  
**Челябинский государственный университет**  
**Институт электрофизики УрО РАН**  
**при участии**  
**НИИ физики Южного федерального университета**

## **В Н К С Ф – 26.2**

**Всероссийская научная конференция**  
**студентов-физиков и молодых учёных**



**Материалы конференции**  
**Информационный бюллетень**

**март 2022**

ISBN 978-5-93667-204-0

УДК 53

ББК В3я431

В 850

## **ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК:**

**Александр Арапов**

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Связь по интернет, общее редактирование:** Александр Арапов (АСФ России)

**Обработка содержательной части тезисов по секциям:** научные секретари – эксперты секций - члены научного комитета конференции ВНКСФ-26.2, данные о которых напечатаны в разделе *«Состав оргкомитета и редколлегии ВНКСФ-26.2»*, *страницы 5-6*

**Компьютерная верстка, редактирование:** Арапов Александр, Арапова Елизавета, Бураева Елена (Ростов-на-Дону).

**Дизайн:** Кайгородова Ольга (Екатеринбург), Александр Арапов.

**Поддержка сайта:** Александр Арапов, Студия физиков «Спектр»

**Программирование, автоматизация:** Алексей Исаков (Екатеринбург), Елизавета Арапова.

**Сборник тезисов, материалы Двадцать шестой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-26.2):** материалы конференции, тезисы докладов: В 2 т.Т.2 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону-Уфа: издательство АСФ России, 2022.

В сборнике представлены тезисы докладов, посвященных различным аспектам современной физики, представленные на Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых 26.2, проходившей он-лайн формате в марте 2022 г.

135 тезисов, 206 страниц формата А4. Копия сборника с персональными анкетами и фото участников конференции, а также архивы конференций ВНКСФ: 11-25 прилагается на сайте [www.asf.ural.ru](http://www.asf.ural.ru)

Сборник предназначен для преподавателей, аспирантов, студентов, научных работников и прочих интересующихся современной физикой людей, работающих в области физических наук и смежных с ней областях.

ВНКСФ-26.2 проводится при поддержке: Института электрофизики УрО РАН, Башкирского государственного университета, Уральского федерального университета, Челябинского государственного университета, Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Оргкомитет конференции выражает благодарность всем ученым – физикам Уфы, Екатеринбурга, Ростова-на-Дону, Новосибирска и Российской Федерации за активное участие в конференции!

© Ассоциация студентов – физиков и молодых ученых России, 2022 г.

620063, Екатеринбург, а.я. 759, тел: (923) 422-74-34, e-mail: [asf@asf-ur.ru](mailto:asf@asf-ur.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ:

### Общая информация о конференции ВНКСФ-26.2:

1. Состав оргкомитета и редакционной коллегии ВНКСФ-26.2: ..... 5
2. Статистика заявок, докладов и участия ВНКСФ-26.2 по секциям ..... 7
3. Статистика заявок, докладов и участия ВНКСФ-26.2 по регионам ..... 8

### Тезисы участников конференции ВНКСФ-26.2:

4. Тезисы участников конференции с данными о каждом участнике конференции по секциям:
  - 01-Теоретическая физика, математическая физика ..... 9
  - 02-Физика конденсированного состояния вещества ..... 13
  - 03-Физика полупроводников и диэлектриков ..... 35
  - 06-Магнетизм. .... 39
  - 07-Оптика и спектроскопия ..... 63
  - 09-Физическая химия, химическая физика ..... 67
  - 10-Астрофизика, физика космоса, современные и перспективные космические исследования и технологии ..... 83
  - 11-Биофизика, медицинская физика ..... 85
  - 12-Геофизика: земная кора, океан, атмосфера ..... 97
  - 15- Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы. Инженерная механика ..... 105
  - 16-Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы и композиты ..... 117
  - 17- Радиофизика. Электроника ..... 141
  - 18-Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях ..... 159
  - 19-Теплофизика и теплотехника. Процессы теплообмена ..... 163
  - 20-Физика и экология. Экологические проблемы в энергетике ..... 169
  - 21-Проблемы и методологии преподавания физики. История физики и техники ..... 197
- Алфавитный указатель сборника по участникам конференции ..... 205



**Председатель редколлегии и оргкомитета конференций ВНКСФ:**

**Александр Арапов (АСФ России)**

**e-mail: [agarov@asf.urfu.ru](mailto:agarov@asf.urfu.ru), телефон: (863) 522-48-18, 8-923-422-74-34**

**Редакционная коллегия научного комитета, по секциям:**

**1. Теоретическая физика, математическая физика**

- **Гусаревич Евгений Степанович**, к.ф.-м.н., с.н.с., доцент кафедры теоретической физики Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, г. **Архангельск**, e-mail: [gusarevich@gmail.com](mailto:gusarevich@gmail.com), (АСФ России)
- **Лаврухин Иван Владимирович**, аспирант 3 года обучения, Омский государственный университет, г. **Омск**, e-mail: [jovanni.omsu@gmail.com](mailto:jovanni.omsu@gmail.com), (АСФ России)

**2. Физика конденсированного состояния вещества**

- **Максимова Елена Михайловна**, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированных сред и физических методов в медицине, Физико-технический институт Крымского федерального университета, г. **Симферополь**, e-mail: [maksimovaem@cfuv.ru](mailto:maksimovaem@cfuv.ru)
- **Меренцов Александр Ильич**, к.ф.-м.н., ассистент КФКС и наноразмерных систем ИЕНиМ УрФУ, Екатеринбург, e-mail: [alexander.merentsov@urfu.ru](mailto:alexander.merentsov@urfu.ru) (АСФ России)

**3. Физика полупроводников и диэлектриков**

- **Исламов Дамир Ревинирович**, к.ф.-м.н., с.н.с. Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, г. **Новосибирск** (АСФ России), e-mail: [damir@isp.nsc.ru](mailto:damir@isp.nsc.ru) (АСФ России)

**4. Физика атомного ядра и элементарных частиц . Физика высоких энергий.**

- **Осинов Алексей Сергеевич**, директор Научно- производственное отделения развития технологий радиотерапии АО НИИТФА г. **Москва** e-mail: [okdf2007@mail.ru](mailto:okdf2007@mail.ru) (АСФ России)

**5. Физика плазмы, электрофизика, плазменные технологии (секция-семинар)**

- **Чепусов Александр Сергеевич**, к.т.н., н.с. Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: [chepusov@ier.uran.ru](mailto:chepusov@ier.uran.ru) (АСФ России)

**6. Магнетизм**

- **Косырев Николай Николаевич**, к.ф.-м.н., н.с., лаб. магнитодинамики Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. **Красноярск**, e-mail: [kosyrev@inbox.ru](mailto:kosyrev@inbox.ru)

**7. Оптика и спектроскопия**

- **Двойнишников Сергей Владимирович**, д.т.н., с.н.с., Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. **Новосибирск**, e-mail: [dv.s@mail.ru](mailto:dv.s@mail.ru)

**9. Физическая химия, химическая физика**

- **Рогозина Марина Викторовна**, к.ф.-м.н., с.н.с. лаб. разработки катализаторов, Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти (ВНИИ НП) **Москва** e-mail: [marinkarogozina@yandex.ru](mailto:marinkarogozina@yandex.ru) (АСФ России)

**10. Астрофизика, физика космоса – (секция – семинар)**

- **Попова Мария Эриковна**, с.н.с., Коуровская астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет, e-mail: [maria.popova@urfu.ru](mailto:maria.popova@urfu.ru)

## 11. Биофизика, медицинская физика

- **Закирьянов Фарит Кабирович**, зам. дир. по научной и инновационной деятельности, к.ф.-м.н., доцент каф. теор. физики ФТИ Башкирского государственного университета, г. Уфа  
e-mail: [farni@rambler.ru](mailto:farni@rambler.ru) (АСФ России)

## 12. Геофизика: земная кора, океан, атмосфера

- **Тарантин Михаил Викторович**\*, к.т.н., научный сотрудник, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, e-mail: [gptmv@mi-perm.ru](mailto:gptmv@mi-perm.ru) (АСФ России)

## 15. Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы. Инженерная механика.

- **Ильин Владимир Алексеевич**, к.ф.-м.н., доцент, кафедры физики фазовых переходов, физический факультет ПермГУ, Пермь e-mail: [ilin1@psu.ru](mailto:ilin1@psu.ru) (АСФ России)

## 16. Материаловедение . Физика кристаллов. Наноматериалы и композиты.

- **Габдрахманова Лилия Айратовна**, к.ф.-м.н., доцент каф. инфокоммуникационной технологии и нанoeлектроники Физико-технического института Башкирского государственного университета, Уфа e-mail: [a-gabdrahmanova@mail.ru](mailto:a-gabdrahmanova@mail.ru) (АСФ России)

## 17. Радиофизика

- **Голицын Александр Андреевич**, к.т.н., н.с., Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирский национальный исследовательский университет г. Новосибирск e-mail: [aag-09@yandex.ru](mailto:aag-09@yandex.ru) (АСФ России)

## 18. Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях.

- **Голицын Александр Андреевич**, к.т.н., н.с., Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирский национальный исследовательский университет Новосибирск e-mail: [aag-09@yandex.ru](mailto:aag-09@yandex.ru) (АСФ России)
- **Шауро Виталий Павлович**, к.ф.-м.н., Институт физики СО РАН, Красноярск e-mail: [Shaurkin@hotmail.com](mailto:Shaurkin@hotmail.com) , (АСФ России)

## 19. Теплофизика и теплотехника. Процессы тепломассобмена.

- **Анкудинов Владимир Евгеньевич**, к.ф.-м.н., н.с. теоретический отдел, Институт физики высоких давлений им. Верещагина РАН, г. Москва, e-mail: [vladimir@ankudinov.org](mailto:vladimir@ankudinov.org) (АСФ России)

## 20. Физика и экология. Экологические проблемы в энергетике.

- **Бураева Елена Анатольевна**, к.х.н., доцент, зав. лаб. радиоэкологических исследований, зам. директора НИИ физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, e-mail: [buraeva\\_elena@mail.ru](mailto:buraeva_elena@mail.ru) (АСФ России)

## 21. Проблемы и методологии преподавания физики. История физики и техники.

- **Воробьев Максим Олегович**, инженер, преподаватель. НИИ нанотехнологии и наноматериалы" Тамбовского государственного университета, г. Тамбов, школа № 3 г. Котовска, e-mail: [vorob--yov@mail.ru](mailto:vorob--yov@mail.ru) (АСФ России)

## Примечания:

- *курсивом отмечены* (или АСФ России) члены научного комитета, которые участвуют в нем по приглашению АСФ России (или являются членами АСФ) и представляют мнение Ассоциации в научном комитете конференции.

Они же являются научными секретарями секций: предварительное рассмотрение тезисов, их редактирование и в дальнейшем ведение заседаний секций.

**Информация по количеству заявок и докладов по секциям ВНКСФ-26.2**

<b>Секция</b>	<b>заявки</b>	<b>тезисы</b>	<b>он лайн</b>	<b>только публикация</b>
01 - Теоретическая физика. Математическая физика	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>1</b>
02 - Физика конденсированного состояния вещества	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>6</b>	<b>12</b>
03 - Физика полупроводников и диэлектриков	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
04 - Физика атомного ядра и элементарных частиц, высоких энергий.	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
05 - Электрофизика. Физика плазмы, плазменные технологии.	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
06- Магнетизм.	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>2</b>	<b>14</b>
07 - Оптика и спектроскопия.	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
08 - Квантовая электроника и лазерная физика.	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
09 - Физическая химия, хим. физика.	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>6</b>
10 - Астрофизика, физика космоса Космические технологии	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-</b>
11 - Биофизика, медицинская физика.	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
12 - Геофизика: земная кора, океан, атмосфера.	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
13 - Акустика.	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
14 - Статистическая механика жидкости, газа и плазмы. Молекулярная физика.	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
15 - Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы. Инженерная механика.	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
16 - Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы, композиты.	<b>19</b>	<b>18</b>	<b>6</b>	<b>12</b>
17 - Радиофизика. Электроника.	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>2</b>	<b>10</b>
18 – Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях.	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
19 - Теплофизика и теплотехника. Процессы тепломассобмена.	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
20 - Физика и экология	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>16</b>	<b>3</b>
21 – Проблемы и методологии преподавания физики. История физики.	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
Всего, по всем секциям	<b>135</b>	<b>129</b>	<b>54</b>	<b>75</b>

**Статистика заявок, тезисов и докладов ВНКСФ-26.2  
по городам и регионам (с востока на запад)**

<b>Город</b>	<b>заявки</b>	<b>тезисы</b>	<b>он-лайн</b>	<b>заочные</b>
<b>Сибирь</b>				
Красноярск	2	2	0	2
Томск	3	3	1	2
Кемерово	2	2	2	0
Новосибирск	7	7	7	0
<b>Всего по региону:</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>4</b>
<b>Урал</b>				
Екатеринбург	5	5	3	2
Тюмень	3	2	1	1
Челябинск	5	5	1	4
Пермь	1	1	1	0
Уфа	22	17	9	8
Ижевск	6	6	3	3
<b>Всего по региону</b>	<b>42</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
<b>Северный регион</b>				
Санкт-Петербург	1	1	1	0
Великий Новгород	12	12	0	12
Архангельск	1	1	0	1
<b>Всего по региону</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>1</b>	<b>13</b>
<b>Поволжье</b>				
Казань	1	1	1	0
Нефтекамск	1	1	0	1
Волгоград	1	1	0	1
<b>Всего по региону</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Центральная часть России</b>				
Тверь	2	2	2	0
Москва	1	1	1	0
Тамбов	1	1	0	1
<b>Всего по региону:</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
<b>Южный регион</b>				
Ростов-на-Дону	53	53	8	45
Тихорецк	1	1	0	1
Ставрополь	1	1	1	0
Симферополь	1	1	0	1
Севастополь	1	1	0	1
<b>Всего по региону:</b>	<b>57</b>	<b>57</b>	<b>9</b>	<b>48</b>
<b>Казахстан</b>				
Нур-Султан	1	1	0	1

## 11 - Теоретическая физика. Математическая физика

Синюков Сергей Александрович, магистрант 1 года обучения  
Томск, Томский государственный университет, физический

**Влияние релаксации и нелокальности на формирование структур в некоторых кинетических моделях**

Шаповалов Александр Васильевич, д.ф.-м.н.

e-mail: [ssaykmh@yandex.ru](mailto:ssaykmh@yandex.ru)

стр. 9

\*\*\*

### Влияние релаксации и нелокальности на формирование структур в некоторых кинетических моделях

*Синюков Сергей Александрович*

*Кулагин Антон Евгеньевич, Шаповалов Александр Васильевич*

*Томский государственный университет*

*Шаповалов Александр Васильевич*

*[ssaykmh@yandex.ru](mailto:ssaykmh@yandex.ru)*

В данной работе рассмотрено влияние релаксации в двух нелокальных моделях.

Первая модель описывает кинетические процессы в нелокальной популяционной модели, описываемой обобщенным одномерным уравнением Фишера–КПП с нелокальными конкурентными потерями в условиях слабой диффузии

$$u_t(x,t) = D\tilde{D}_a(t)u_{xx}(x,t) + a(t)u(x,t) - \kappa u(x,t) \int_{-\infty}^{\infty} b(x,y,t)u(y,t)dy, \quad (1)$$

где  $u_t$ ,  $u_{xx}$  – частные производные по соответствующим переменным;  $D\tilde{D}_a(t)$  – коэффициент диффузии; кинетический коэффициент  $a(t)$  характеризует темп воспроизведения популяции в общем случае зависящий от  $t$ ;  $\kappa$  – параметр нелинейности; интеграл  $\int_{-\infty}^{\infty} b(x,y,t)u(y,t)dy$  описывает нелокальные конкурентные потери, в котором  $b(x,y,t)$  (функция влияния) определяет степень нелокальности взаимодействия в популяции.

Во второй модели рассматриваются кинетические процессы в двумерной нелокальной версии модели активной квазинейтральной плазмы на парах металлов, описываемой кинетическим уравнением с нелокальной кубичной нелинейностью

$$\begin{aligned} \partial_t u(\vec{x},t) = & D\tilde{D}_a(t)\Delta u(\vec{x},t) + a(\vec{x},t)u(\vec{x},t) - \\ & - \kappa u(\vec{x},t) \int_{R^2} d\vec{y} \int_{R^2} d\vec{z} b(\vec{x},\vec{y},\vec{z},t)u(\vec{y},t)u(\vec{z},t). \end{aligned} \quad (2)$$

где в уравнении (2) оператор Лапласа в декартовых координатах обозначен  $\Delta$ ,  $\partial_t = \partial/\partial t$ ;  $\kappa$  – параметр нелинейности; выражение  $D\tilde{D}_a(t)$  задает коэффициент амбиполярной диффузии; функция  $a(\vec{x},t)$  определяется кинетическим коэффициентом процесса ионизации нейтральных атомов и их концентрацией и полагается заданной; ядро интеграла в (2),  $b(\vec{x},\vec{y},\vec{z},t)$ , где  $\vec{x},\vec{y},\vec{z} \in R^2$ , пропорционально плотности вероятности тройной рекомбинации при столкновении иона с двумя электронами и будет задаваться в виде модельных функций.

Опираясь на сходство уравнений (1) и (2), с помощью численных методов показано, что при специальном выборе параметров уравнения (2) построенные численные решения демонстрируют формирование пространственно-временных двумерных кольцевых неоднородностей концентрации ионов

$u(\vec{x}, t)$ , подобных одномерным паттернам в случае уравнения (1). Для этого получены структуры для уравнения Фишера–КПП при выборе специально подобранных значений параметров. Затем для параметров уравнения (2) близких параметрам уравнения (1) построены численные решения уравнения (2), которые также демонстрируют формирование структур.

Также дополнительно было проведено исследование влияния релаксации на формирование структур. Для кинетического уравнения (2) релаксация является составной частью модели динамики активной среды. Таким образом, совместное исследование уравнений (1) и (2) взаимно дополняет и расширяет исследование структур в обеих нелокальных реакционно-диффузионных моделях.

Список публикаций:

- [1] Murray J.D. *Mathematical Biology. I. An Introduction (Third Edition)*. – New York; Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2001.
- [2] Ванг В.К. *Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах. Эксперимент и теория*. – М.: Изд-во «ИКИ», 2008.
- [3] Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*: – N. Y.: Wiley, 1977.
- [4] Fuentes M.A., Kuperman M.N., Kenkre V.M. *Nonlocal interaction effects on pattern formation in population dynamics* // *Phys.Rev.Lett.* – 2003. – V. 91. – P. 158104-1–158104-4.
- [5] Трифонов А.Ю., Шаповалов А.В. *Одномерное уравнение Фишера-Колмогорова с нелокальной нелинейностью в квазиклассическом приближении* // *Известия вузов, Физика*. – 2009. – Т.52. – №.9. – С.14–23.
- [6] Levchenko E.A., Shapovalov A.V., Trifonov A.Yu. *Pattern formation in terms of semiclassically limited distribution on lower dimensional manifolds for the nonlocal Fisher–Kolmogorov–Petrovskii–Piskunov equation*// *J. Phys. A: Math. Theor.* – 2014. – V.47. – article ID: 025209. 20 pp.
- [7] Kulagin A.E., Shapovalov A.V. *Semiclassical approach to a nonlocal kinetic model of active optical systems*// *Mathematics*. – 2021. –V. 9. – № 23. –article ID: 2995. 16 pp.
- [8] Torgaev S.N., Kulagin A.E., Evtushenko T.G., Evtushenko G.S. *Kinetic modeling of spatio-temporal evolution of the gain in copper vapor active media* // *Optics Communications*. –2019. – V. 440. – P. 146–149.

## 2 - Физика конденсированного состояния вещества

Аверкиев Игорь Кронидович, аспирант 2 года обучения  
Ижевск, Удмуртский ФИЦ УрО РАН, Физико-технический институт  
**Исследование электронной и локальной атомной структуры соединений  $TiH_2$  и  $Ti_2AlC$  методами рентгеноэлектронной и электронной спектроскопии**  
Бакиева Ольга Ринатовна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [averkiev1997@mail.ru](mailto:averkiev1997@mail.ru) стр. 13

Астафьев Павел Андреевич, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Фильтрация АЧХ при исследовании свойств функциональных материалов на микрополосковой линии в СВЧ-диапазоне**  
Резниченко Лариса Андреевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [l.b.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru](mailto:l.b.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru) стр. 14

Волков Дмитрий Вячеславович, н.с.  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики  
**Структура, диэлектрические и магнитные свойства систем твердых растворов на основе манганита лантана- висмута, модифицированного оксидом ниобия**  
Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [dvvolkov@sfedu.ru](mailto:dvvolkov@sfedu.ru) стр. 15

Глазунова Екатерина Викторовна, н.с.  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ физики  
**Влияние механоактивации на структуру и свойства твердого раствора  $Bi_{0.95}Pb_{0.05}Fe_{0.98}Nb_{0.012}W_{0.008}O_3$**   
Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [kate93g@mail.ru](mailto:kate93g@mail.ru) стр. 16

Дмитриев Виктор Олегович, аспирант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Физический  
**Особенности электронной структуры  $MeOx$ /МУНТ**  
Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [ydmitriev@sfedu.ru](mailto:ydmitriev@sfedu.ru) стр. 18

Ерагер Ксения Романовна, аспирант  
Челябинск, Челябинский государственный университет, физический  
**Ab initio исследование мартенситной фазы модулированных структур сплавов Ni-Mn-In с избытком Mn**  
Соколовский Владимир Владимирович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [eragerk@rambler.ru](mailto:eragerk@rambler.ru) стр. 19

Жидель Карина Михайловна, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ физики  
**Исследование анизотропии в пленках  $Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb_2O_6$**   
Павленко Анатолий Владимирович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [karinagidele@gmail.com](mailto:karinagidele@gmail.com) стр. 20

Максимов Глеб Сергеевич, 5 курс  
Симферополь, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Физико-технический институт  
**Особые участки теплового расширения эпитаксиальной пленки со структурой**  
Максимова Елена Михайловна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [neondreamer00@gmail.com](mailto:neondreamer00@gmail.com) стр. 21

Меренцов Александр Ильич, с.н.с.  
Екатеринбург, Институт физики металлов УрО РАН, лаб. электрических явлений  
**Формирование структурных фрагментов в дихалькогенидах титана, замещённых 3d-переходными металлами**  
e-mail: [Alexander.Merentsov@urfu.ru](mailto:Alexander.Merentsov@urfu.ru) стр. 22

Мойса Максим Олегович, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ физики  
**Электрофизические характеристики твёрдых растворов системы PZT-CdNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>**  
Резниченко Лариса Андреевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [moysa@sfedu.ru](mailto:moysa@sfedu.ru) стр. 23

Никулин Андрей Алексеевич, 4 курс  
Екатеринбург, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт естественных наук и математики  
**Электрофизические свойства кремния при высоких давлениях**  
Тебеньков Александр Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [eternalenvy123@gmail.com](mailto:eternalenvy123@gmail.com) стр. 24

Поляков Савелий Викторович, 2 курс  
Кемерово, Кемеровский государственный университет, Институт фундаментальных наук  
**Электронная структура и химическая связь в BeAP<sub>2</sub> (A=C, Si)**  
Гордиенко Алексей Болеславович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [savelij.polyakov@mail.ru](mailto:savelij.polyakov@mail.ru) стр. 25

Раев Андрей Александрович, аспирант 1 года обучения  
Челябинск, Челябинский государственный университет, физический  
**Влияние давления в системе сплавов Гейслера Ni<sub>2</sub>MnX (X=Ga, In, Sn, Sb)**  
Соколовский Владимир Владимирович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [landrew637@gmail.com](mailto:landrew637@gmail.com) стр. 27

Саносян Артур Азатович, аспирант 3 курса обучения  
Челябинск, Челябинский государственный университет, физический  
**Исследование из первых принципов структурных свойств сплавов Гейслера на основе Co<sub>2</sub>Ni<sub>1+x</sub>Z<sub>1-x</sub> (Z=Al, Ga, In, Sn)**  
Соколовский Владимир Владимирович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [arthursanosyan@mail.ru](mailto:arthursanosyan@mail.ru) стр. 28

Сафаргалиев Данир Ильдарович, 3 курс  
Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт  
**Расчет зонной структуры AgCrS<sub>2</sub>**  
Давлетшина Алиса Данисовна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [davletshinaalisa@rambler.ru](mailto:davletshinaalisa@rambler.ru) стр. 29

Соломенникова Александра Станиславовна, зав. каб.  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, Институт математики и информационных технологий  
**Пленки диоксида олова, полученные ВЧ-магнетронным напылением с ионно-лучевой обработкой**  
Крылов Петр Николаевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [solomennikova@udman.ru](mailto:solomennikova@udman.ru) стр. 30

Тимофеев Вячеслав Сергеевич, магистрант 2 года обучения  
Кемерово, Кемеровский государственный университет, Институт фундаментальных наук  
**Электронное строение и динамика решетки Be<sub>2</sub>NCl**  
Гордиенко Алексей Болеславович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [slava.timofeev.mail@gmail.com](mailto:slava.timofeev.mail@gmail.com) стр. 31

Хаметова Элина Фанилевна, 1 курс  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, Институт математики и физики  
**Разработка метода решения задачи перекрывающихся диапазонов в EXELFS спектроскопии**  
Бакиева Ольга Ринатовна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [elinaphanilevna851@gmail.com](mailto:elinaphanilevna851@gmail.com) стр. 32

# Исследование электронной и локальной атомной структуры соединений $TiH_2$ и $Ti_2AlC$ методами рентгеноэлектронной и электронной спектроскопии

*Аверкиев Игорь Кронидович*

*Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН*

*Бакиева Ольга Ринатовна, к.ф.-м.н.*

*E-mail averkiev1997@mail.ru*

В сверхтонких поверхностных слоях протекают многие сложные физико-химические процессы, без исследования которых невозможно получить полную картину свойств. Поэтому для анализа химического состава и типа химических связей широко востребована рентгено-фотоэлектронная спектроскопия (XPS - X-ray photoelectron spectroscopy). Уменьшение размеров наноструктур, синтез слоистых структур на основе двумерных материалов демонстрирует необходимость знания не только типа химической связи, но и анализа электронной структуры сильно локализованных областей. В этом отношении стандартные методы, такие как ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (UPS - Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy), не обеспечивают пространственного разрешения, необходимого для исследования материала в нанометровом масштабе. Данную проблему позволяет решить электронная спектроскопия, а именно спектроскопия потерь энергии валентных электронов (VEELS – Valence Electron Energy Loss Spectroscopy), которая реализована в области низких потерь энергии электронов (~50 эВ) и предоставляет информацию, аналогичную ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии, и содержит сведения о зонной структуре. Кроме характерных пиков плазменных потерь, данная область отображает плотность незанятых состояний над уровнем Ферми [1]. Кроме этого в электронной спектроскопии реализован метод анализа протяженных тонких структур энергетических потерь энергии электронов (EXELFS – Extended Electron Energy Loss Fine Structure). Эта структура формируется за краем возбуждения внутреннего уровня атома вещества, и поскольку природа формирования аналогична XAFS спектрам, она содержит информацию о параметрах локальной атомной структуры исследуемого объекта – длины химической связи, координационные числа и параметры дисперсии межатомных расстояний. [2].

В настоящей работе в качестве объектов исследования выступали соединения  $TiH_2$  и  $Ti_2AlC$ . Выбор данных объектов исследования обусловлен тем, что эти соединения являются прекурсорами для получения двухслойных материалов, MXenes (соединения с общей формулой  $M_nX_nT_x$ , где M – переходный металл, X – C и/или N,  $T_x$  – функциональная группа краевых и поверхностных атомов, которые обычно состоят из –OH, =O, –F.). В свою очередь, выбор прекурсоров в значительной степени влияет на свойства конечного продукта, поэтому исследование физико-химических свойств данных соединений является важной задачей.

В ходе исследований были получены спектры энергетических потерь электронов в режиме обратного отражения от поверхности образца в диапазоне до 600 эВ в шкале потерь энергии вторичного электрона (рис. 1).

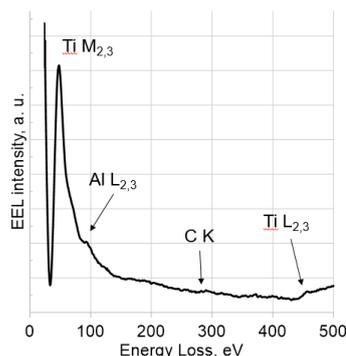


рис. 1. Экспериментальный спектр энергетических потерь электронов

Проведен количественный анализ EXELFS спектров и определены изменения параметров локальной атомной структуры. Анализ области малых потерь энергии электронов позволил определить изменения в электронной структуре. Определены энергии поверхностного и объемного плазмона, также определены энергии межзонных переходов поверхностных групп. В результате было сделано предположение, что атомы титана образуют октаэдрическое окружение вокруг атомов углерода и атомов алюминия. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №121030100002-0

Список публикаций:

[1] Herrera-Pérez G., Ornelas-Gutiérrez C., Reyes-Montero A. et al. // *Micron*. 2021. V. 149. P. 103124.

[2] Averkiev I. K., Bakieva O. R., Nemtsova O. M. et al. // *Applied Surface Science*. 2021. V. 539. P. 148243

## Фильтрация АЧХ при исследовании свойств функциональных материалов на микрополосковой линии в СВЧ-диапазоне

*Астафьев Павел Андреевич*

*Павелко Алексей Александрович*

*Южный федеральный университет*

*Резниченко Лариса Андреевна, д.ф.-м.н.*

*[l.b.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru](mailto:l.b.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru)*

Исследования электродинамических свойств функциональных материалов в СВЧ-диапазоне активно ведутся уже в течение нескольких десятилетий. Много внимания в этой области уделяется исследованию сегнетоэлектриков, обладающих высокими значениями относительной диэлектрической проницаемости, что, в совокупности с рядом других параметров, позволяет использовать их во многих радиоэлектронных устройствах, таких как СВЧ-резонаторы, аттенюаторы и фильтры. Применение сегнетоэлектриков в СВЧ-технике позволило выполнить требование миниатюризации, предъявляемое ко всем современным радиоэлектронным компонентам [1]. Анализ рынка показывает, что в доступных для коммерческого использования резонаторах применяются сегнетоэлектрики, принадлежащие по большей части к однокомпонентным или двухкомпонентным системам, а результаты исследований многокомпонентных твердых растворов ограничиваются применениями, вероятно, в высокоточных измерительных приборах и военной технике, при этом особенности методов исследования описываются в подробностях достаточно редко. Однако развитие технологий производства керамик позволяют получать сложные многокомпонентные системы, которые, предположительно, обладают высокими показателями СВЧ-поглощения в широких диапазонах частот, что открывает перспективы их применения в аттенюаторах или радиопоглощающих покрытиях. Поэтому разработка новых и описание существующих методик изучения функциональных материалов позволит существенно ускорить исследования в этой области. Одним из наиболее простых и быстрых методов исследования СВЧ-свойств материалов является метод измерения энергии поглощения материалов на микрополосковой линии (МПЛ) [2]. Ранее с использованием данного метода нами была исследована многокомпонентная система, состоящая из сегнетоэлектрического ( $\text{PbTiO}_3$ ), антисегнетоэлектрического ( $\text{PbZrO}_3$ ) и релаксорного ( $\text{PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3$ ) компонентов [3-4]. По результатам исследования стало ясно, что для описания зависимости радиопоглощающих свойств от фазового состава, помимо частотных зависимостей коэффициента поглощения, необходимо использовать некоторые обобщающие характеристики, такие как эффективная полоса поглощения. Однако для правильного расчета таких характеристик требуется проводить фильтрацию частотных зависимостей на нескольких этапах.

Целью данной работы является исследование влияния фильтрации АЧХ на конечные результаты расчета эффективной полосы поглощения материалов.

Влияние фильтрации на результаты расчетов показано на примере нескольких образцов сегнетоэлектрической керамики состава  $0.98(x\text{PbTiO}_3 - y\text{PbZrO}_3 - z\text{PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3) - 0.02\text{PbGeO}_3$  с различными концентрациями  $\text{PbTiO}_3$ . Образцы представляют собой плоские диски высотой 1 мм и диаметром 10 мм. Исследования проводились с использованием векторных анализаторов цепей P4M-18 "Микран" и P9375A "Keysight" и МПЛ с коаксиальными разъемами, имеющими предел по частоте 18 ГГц. Образцы помещались в центр МПЛ на фиксированную позицию, смещение от центрального положения составляло не более 0.5 мм.

Процедура получения значения эффективной полосы поглощения состоит из следующих основных этапов: измерение частотных зависимостей S-параметров пустой МПЛ и МПЛ с образцом; расчет частотной зависимости коэффициента поглощения по следующим формулам:

$$d = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2, \quad (1)$$

где  $d$  – коэффициент поглощения энергии электромагнитного излучения;

$$D_i = d_i - d_0, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент поглощения  $i$ -го образца,  $d_i$  – коэффициент поглощения МПЛ с  $i$ -ым образцом,  $d_0$  – коэффициент поглощения пустой МПЛ; расчет эффективной ширины полосы поглощения по формуле:

$$\Delta f_{\text{eff}} = \frac{1}{D_{\text{max}}} \int_0^{f_{\text{max}}} D(f) df, \quad (3)$$

где  $D_{\text{max}}$  – максимальное значение коэффициента поглощения во всем измеряемом диапазоне частот,  $f_{\text{max}}$  – максимальная частота,  $D(f)$  – функция зависимости коэффициента поглощения от частоты.

Результаты измерения и расчетов показывают, что полоса частот с наиболее высоким уровнем поглощения (более -10 Дб) находится в области 10 МГц – 2,5 ГГц (рис. 1 б). Характер изменения ширины

полосы поглощения (рис. 1 c) связан с изменением диэлектрической проницаемости образцов [3]. В отсутствие фильтрации, поведение рассчитанной эффективной полосы поглощения (рис. 1 d) сильно отличается от реальных данных. После применения фильтрации рассчитанная зависимость полосы поглощения от концентрации (рис. 1 h) хорошо согласуется с изначальными результатами измерений. При этом фильтрация не сильно сказалась на зависимости S-параметров (рис. 1. a, e) и уровня поглощения (рис. 1 b, f) от частоты.

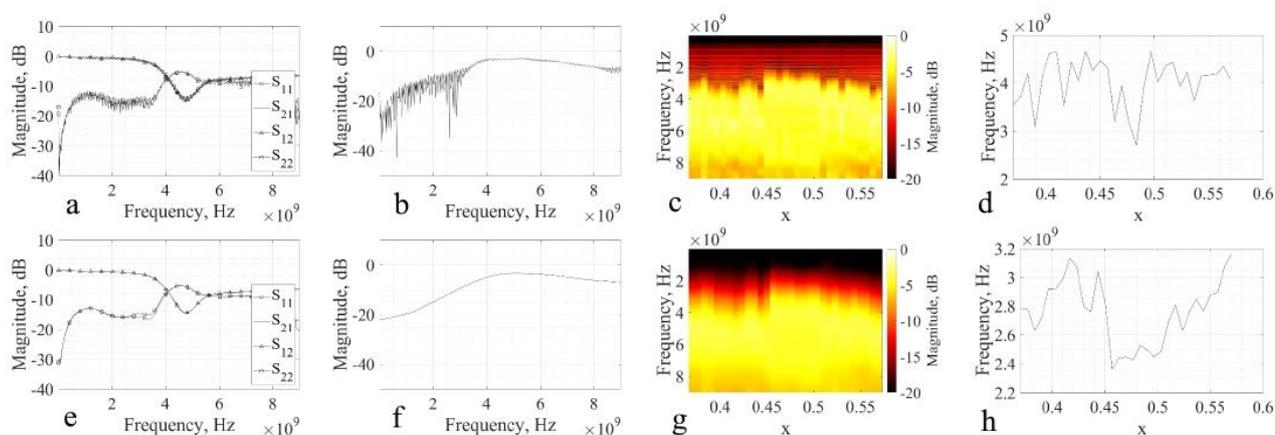


рис.1. Зависимости S-параметров (a, e) и уровня поглощения (b, f) от частоты, зависимости дисперсии уровня поглощения от концентрации  $PbTiO_3$  (c, g) и зависимости эффективной ширины полосы поглощения от концентрации  $PbTiO_3$  (d, h) до и после фильтрации, соответственно.

Результаты исследования показали, что для повышения точности расчета можно применять фильтрацию зависимостей S-параметров и уровня поглощения от частоты, при этом нужно проводить анализ результатов на всех этапах вычислений, чтобы не снизить фактическую точность измерений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности, научный проект № 0852-2020-0032), (БА30110/20-3-07ИФ).

Список публикаций:

- [1] A. Tagantsev, et al., *Ferroelectric Materials for Microwave Tunable Applications*, *Journal of Electroceramics* 11, 66 (2003). DOI: 10.1023/B:JECR.0000015661.81386.e6
- [2] Рейзенкинд Я. А., Клещенков А. Б., Лерер А. М., Нойкин Ю. М. // Сравнительная экспресс-оценка потерь энергии электромагнитного поля в электрически активных материалах с помощью микрополосковой линии. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального ун-та. 2021. 82 с.
- [3] Астафьев П. А., Павелко А. А., Нойкин Ю. М. Электродинамические свойства твердых растворов  $0.98(xPbTiO_3 - yPbZrO_3 - zPbNb_2/3Mg_1/3O_3) - 0.02PbGeO_3$  в СВЧ диапазоне // Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения. Сборник трудов III молодежной всероссийской научной конференции с международным участием (20 – 23 сентября 2021 г.). 2021. С. 167-171.
- [4] Астафьев П.А., Павелко А.А., Нойкин Ю.М. Твердые растворы  $0.98(xPbTiO_3 - yPbZrO_3 - zPbNb_2/3Mg_1/3O_3) - 0.02PbGeO_3$ : взаимосвязь состава и электродинамических параметров в СВЧ диапазоне // Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем (Анализ современного состояния и перспективы развития): сборник трудов Десятого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума (Ростов-на-Дону, 27–28 декабря 2021 г.): в 2 т. 2021. Т. 2. С. 26-29.

## Структура, диэлектрические и магнитные свойства систем твердых растворов на основе манганита лантана- висмута, модифицированного оксидом ниобия

Волков Дмитрий Вячеславович

Павелко Алексей Александрович, Шилкина Лидия Александровна, Вербенко Илья Александрович

Южный федеральный университет

Вербенко Илья Александрович

[dvolkov@sfedu.ru](mailto:dvolkov@sfedu.ru)

В настоящее время одними из наиболее интенсивно изучаемых объектов в материаловедении являются мультиферроики, благодаря их широкому спектру возможных применений. Одной из интересных, и, в то же время, не в полной степени изученной является бинарная система твердых растворов (ТР)  $Bi_{1-x}La_xMnO_{3\pm\delta}$ . Однако, особенности их магнитной структуры и диэлектрических свойств не позволяют достичь необходимых для широкого практического применения значений физических характеристик. Так, к дискуссионным вопросам

относится происхождение высоких значений магнитоэлектрического эффекта [1]. Причиной их возникновения может быть комбинация магнитоэлектрического эффекта, релаксации поляризованных структур типа Максвелла-Вагнера и явлений, связанных с объемным и межслоевым магнетосопротивлением. Исследованию диэлектрических и магнитоэлектрических свойств указанных ТР препятствует другая известная проблема подобных соединений – образование примесных фаз, что наряду с переменной валентностью катионов, входящих в состав ТР, обеспечивает им высокую электропроводность, критически зависящую от условий изготовления керамик. Частичного решения указанных трудностей можно ожидать при замещении  $Mn^{3+}/Mn^{4+}$  на катион  $Nb^{5+}$ .

Таким образом, целью настоящей работы явилось установление влияние на структурные, диэлектрические и магнитные свойства состава керамик ТР  $Bi_{0,5}La_{0,5}Mn_{0,98}Nb_{0,02}O_{3\pm\delta}$ .

В работе методом двухстадийного твердофазного синтеза ( $T_1=1073$  К,  $\tau_1=10$  ч. и  $T_2=1223$  К,  $\tau_2=10$  ч.), были получены модифицированные ТР на основе  $Bi_{1-x}La_xMnO_{3\pm\delta}$ . Модифицирование проводили внедрением оксида ниобия  $Nb_2O_5$ , в соответствии с формулой  $Bi_{0,5}La_{0,5}Mn_{0,98}Nb_{0,02}O_{3\pm\delta}$ . Спекание проводили по обычной керамической технологии ( $T_{сп.}=1293$  К,  $\tau_{сп.}=2,5$ ч.). Структура керамик была исследована на дифрактометре ДРОН 3. Электрическое сопротивление образцов определяли с помощью измерителя высоких сопротивлений Agilent 4339В в присутствии постоянной магнитной индукции  $H=0,86$  Тл. Исследовались образцы диаметром 6 мм и толщиной 1 мм при напряженности электрического поля  $E=1$  В/мм. Образцы помещали между полюсов электромагнита в заливной криостат, сделанный из немагнитных материалов, который наполнялся жидким азотом. Исследование диэлектрических свойств проведено в интервале температур от  $T=(80\div 300)$  К и широком диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц.

Показано, что изученные в работе керамические образцы однофазны, практически беспримесны, имеют высокую экспериментальную плотность и структуру близкую к кубической (при комнатной температуре). На термочастотных зависимостях диэлектрической проницаемости наблюдаются аномалии, поведение которых связано с изменением частоты электрического поля. Природа такого поведения уточняется. Экспериментальные значения тангенса диэлектрической проницаемости, позволяют связать полученные результаты с эффектами, вызванными ростом электропроводности многослойной структуры, образованной зернами и границами между ними. Подобные аномалии ранее наблюдались в соединениях кислородно-октаэдрического типа, содержащих ионы переменной валентности [2-4]. В присутствии внешнего магнитного поля было обнаружено отрицательное магнетосопротивление, величина и характер которого позволяют отнести его к колоссальному магнетосопротивлению.

Полученные данные целесообразно использовать при дальнейшей разработке новых материалов на основе мультиферроиков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032)/(БА30110/20-3-071Ф) под руководством директора НИИ физики ЮФУ, д.ф.-м.н, Вербенко И.А. ЦКП НИИ физики ЮФУ.

Список публикаций:

- [1] Павленко А.В., Турик А.В., Резниченко Л.А., Шилкина Л.А., Климантин Г.М. // Письма в ЖТФ. 2013. 39(1). 47-53.
- [2] Turik A.V., Pavlenko A.V., Reznichenko L.A. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2014. №78(8). 1042-1045.
- [3] Pavlenko A.V., Turik A.V., Reznichenko L.A., Koshkidko Yu.S. // Physics of the Solid State. 2014. №56(6). 1093-1099.
- [4] Wu Y.J., Lin Y.Q., Gu S.P. & Chen X.M. // Applied Physics A. 2009. 97. 191-194.

## **Влияние механоактивации на структуру и свойства твердого раствора**

**$Bi_{0,95}Pb_{0,05}Fe_{0,98}Nb_{0,012}W_{0,008}O_3$**

**Глазунова Екатерина Викторовна**

**Шилкина Лидия Александровна**

*Южный федеральный университет, научно-исследовательский институт физики*

*Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.*

*[kate93g@mail.ru](mailto:kate93g@mail.ru)*

### **Введение**

Одним из бурно развивающихся в настоящее время направлений является физика мультиферроиков. К мультиферроикам относятся материалы, сочетающие в себе два и более типов упорядочений: сегнетоэлектрические, магнитные и/или сегнетоэластические (СЭ). Их взаимодействие приводит к возникновению эффектов (магнитоэлектрический, магнитоэлектрический), необходимых для создания устройств управления электрическим и магнитным полями и развития спин- и стрейнтроники. Наиболее

исследованным однофазным мультиферроиком является феррит висмута ( $\text{BiFeO}_3$ ) ввиду того, что он имеет относительно высокие температуры СЭ и магнитного переходов  $T_C = 1123 \text{ K}$ ,  $T_N = 643 \text{ K}$  [1]. Кроме того, в тонких пленках  $\text{BiFeO}_3$  впервые был обнаружен гигантский магнитоэлектрический эффект [2], что позволило говорить о возможности его практического применения [3]. Однако, практическому применению  $\text{BiFeO}_3$  препятствует низкий уровень магнитоэлектрических взаимодействий, обусловленный особенностями структуры и большой разницей в температурах СЭ и магнитного переходов. Эту проблему можно попытаться решить методом создания твердых растворов (ТР) на основе феррита висмута с другими мультиферроиками и управления их свойствами в рамках обычной керамической технологии.

В связи с этим актуальным представляется установление влияния механоактивации (МА) на структуру и свойства ТР состава  $\text{Bi}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{Fe}_{0.98}\text{Nb}_{0.012}\text{W}_{0.008}\text{O}_3$ .

#### Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выступил ТР состава  $\text{Bi}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{Fe}_{0.98}\text{Nb}_{0.012}\text{W}_{0.008}\text{O}_3$ . Изготовление ТР осуществляли методом двухстадийного твердофазного синтеза при температурах  $T_1 = 800^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 850^\circ\text{C}$ ;  $\tau_1 = \tau_2 = 10$  часов; и спекания по обычной керамической технологии,  $T_{\text{сп.}} = 870^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 2$  часа. МА осуществляли в шаровой планетарной мельнице высокоэнергетического помола АГО-2 на стадии изготовления пресс-порошка, подготовленных к спеканию. Помол производился в спиртовой среде в течение 15 мин., частота вращения барабана составляла 1050 об/мин.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН 3.0 ( $\text{CoK}_\alpha$  – излучение, фокусировка по Брэггу – Брентано). Точность определения параметров ячейки: линейных  $\Delta a = \Delta c = \Delta b = \pm 0.003 \text{ \AA}$ ; угловых  $\Delta \alpha = \pm 0.05^\circ$ ; объема  $\Delta V = \pm 0.05 \text{ \AA}^3$ . Исследование микроструктуры сколов образцов осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390L. Комплексную относительную диэлектрическую проницаемость измеряли на изготовленном в НИИ физики ЮФУ Лабораторном стенде "Kalipso" с использованием измерителей импеданса "Agilent E 4980A", и Hioki 3522-50 в интервале температур от  $25^\circ\text{C}$  до  $400^\circ\text{C}$  и в частотном интервале от 200 до  $10^6$  Гц.

#### Результаты и обсуждения

Рентгенофазовый анализ ТР  $\text{Bi}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{Fe}_{0.98}\text{Nb}_{0.012}\text{W}_{0.008}\text{O}_3$  показал, что он имеет структуру типа перовскита с ромбоэдрически искаженной элементарной ячейкой. На обеих дифрактограммах, как без применения МА, так и с применением МА присутствуют рентгеновские пики примесных фаз  $\text{Bi}_{36}\text{Fe}_2\text{O}_{57}$  и  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ , характерных для соединений на основе  $\text{BiFeO}_3$ . Относительная интенсивность рентгеновских пиков примесных фаз не превышает 5-7 %.

Рентгеноструктурный анализ полученных ТР показал, что объем элементарной ячейки увеличивается от  $62.38 \text{ \AA}^3$  в ТР без МА до  $62.53 \text{ \AA}^3$  в ТР с применением МА. Это может быть связано с образованием в процессе МА точечных дефектов (вакансий), что приводит к распуханию ячейки [12]. Также, важно отметить, что после применения МА относительная плотность керамики повысилась на 5 %, что свидетельствует о положительном влиянии МА на спекаемость ТР.

Исследования микроструктуры ТР  $\text{Bi}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{Fe}_{0.98}\text{Nb}_{0.012}\text{W}_{0.008}\text{O}_3$  показали, что применение МА приводит к значительному уменьшению среднего размера зерен от 8 мкм до 2 мкм, и к увеличению прочности керамики, ввиду того, что скол керамики проходит не по границе зерен, а сквозь их объем, что свидетельствует о сопоставимой прочности самого зерна по сравнению с межзеренной границей.

Исследования действительной,  $\epsilon'/\epsilon_0$ , и мнимой,  $\epsilon''/\epsilon_0$ , частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости от температуры для ТР  $\text{Bi}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{Fe}_{0.98}\text{Nb}_{0.012}\text{W}_{0.008}\text{O}_3$  показали, что для него характерно наличие широкого размытого по частоте максимума в области температур  $T = 370 - 550 \text{ K}$ . Анализ поведения мнимой части диэлектрической проницаемости свидетельствует о высокой электропроводности  $\text{Bi}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{Fe}_{0.98}\text{Nb}_{0.012}\text{W}_{0.008}\text{O}_3$  при указанных температурах.

Применение МА приводит к снижению диэлектрической проницаемости, прежде всего, её мнимой части, что, вероятно, связано с подавлением электропроводности. При этом происходит рост дисперсии диэлектрической проницаемости в области фазового перехода. Подобное поведение может быть связано с изменением характера микроструктуры образца, так как снижение размера зерна и увеличение его прочности способствует увеличению электрического сопротивления [5,6].

#### Выводы

Установлено, что применение МА к ТР  $\text{Bi}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{Fe}_{0.98}\text{Nb}_{0.012}\text{W}_{0.008}\text{O}_3$  способствует уменьшению среднего размера зерна в 4 раза и способствует снижению мнимой части диэлектрической проницаемости, обусловленной электропроводностью ТР, хотя и не позволяет при выбранных режимах существенно снизить содержание примесей.

Полученные результаты целесообразно использовать при разработке новых материалов на основе изученных ТР.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект №0852-2020-0032/(БА30110/20-3-07ИФ) при использовании оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ.

Список публикаций:

- [1] Венецьев Ю.Н., Гагулин В.В.. *Сегнетомагнетики*. // Изв.АН СССР. 1982. № 4. С 78.
- [2] Wang J. et al. *Epitaxial BiFeO<sub>3</sub> multiferroic thin film heterostructures* // Science. 2003. V.299. № 5613. P.1719-1722.
- [3] Reznichenko L. A. et al. *On the Prospects for Technical Applications of BiFeO<sub>3</sub>. Compounds Substituted with Rare-Earth Elements, Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2010. V. 37. № 1. P. 16-17.
- [4] Архаров В.И. *Мезоскопические явления в твердых телах и их мезоструктура* // Проблемы современной физики. Наука.: Л. 1980. С. 357-382.
- [5] Чембарисова Р.Г. *Влияние границ зерен на электропроводность медных славов* // ЖТФ. 2020. Т.90. №4.С.618-620.
- [6] Блатт Ф. *Физика электронной проводимости в твердых телах*. М.: 1971. 470с.

## Особенности электронной структуры MeOx/МУНТ

*Дмитриев Виктор Олегович*

*Халил Малин, Богославская Елена Сергеевна, Невзорова Ника Михайловна, Шматко Валентина Анатольевна*

*Южный федеральный университет*

*Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.*

*[vdmitriev@sfedu.ru](mailto:vdmitriev@sfedu.ru)*

Композиты на основе углеродных нанотрубок и оксидов переходных металлов обладают уникальными физическими и химическими свойствами, что делает их подходящими для множества применений, включая использование в качестве катализаторов, сенсоров, суперконденсаторов. В работе была изучена электронная структуры нанокompозитных материалов на основе оксидов переходных металлов (Cu, Ni) и многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) с помощью методов ближней тонкой структуры рентгеновского поглощения XANES (X-ray absorption near edge structure) и оптической спектроскопии в ультрафиолетовом и видимом диапазонах.

Согласно спектроскопии рентгеновского поглощения, при образовании нанокompозита MeOx/МУНТ происходят изменения в степени окисления и фазовом составе наночастиц CuOx. Рентгеновские спектры поглощения К-края меди в композитах CuOx/МУНТ имеют особенности, связанные с взаимодействием CuOx с нанотрубками, а также изменениями локальной структуры вокруг поглощающего атома. По сравнению с чистыми наночастицами наблюдаются увеличение фазы CuO и уменьшение фазы Cu<sub>2</sub>O [1]. Данные рентгеновского поглощения указывают на формирование новых химических связей в углеродных нанотрубках в результате образования нанокompозита NiOx/МУНТ, связанное с химическим взаимодействием NiOx и нанотрубок. Анализ спектров XANES К-края поглощения Ni показывает, что Ni в составе нанокompозита обладает степенью окисления +2, а также то, что в композите присутствует Ni с разным кислородным окружением [2].

Были измерены спектры оптического поглощения исследуемых образцов. Проведено сравнение спектральных профилей различных образцов. Было обнаружено, что функционализация МУНТ наночастицами оксидов переходных металлов имеет слабое влияние на профили спектра поглощения. В то же время введение наночастиц оксидов металлов может привести к модификации поверхности нанотрубок, что, в свою очередь, приводит к изменению ширины запрещенной зоны.

Список публикаций:

- [1] V. Shmatko, G. Yalovega, A. Barbashova, A. Kuriganova, E. Bogoslavskaya, N. Smirnova // *Key Engineering Materials*. – 2016 – Vol. 683. – P. 215-220.
- [2] V. Shmatko, D. Leontyeva, N. Nevzorova, N. Smirnova, M. Brzhezinskaya, G. Yalovega // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* – 2017.- N 220 P.76-80.

# Ab initio исследование мартенситной фазы модулированных структур сплавов Ni-Mn-In с избытком Mn

Ерагер Ксения Романовна

Байгуллин Данил Расулович, Бучельников Василий Дмитриевич

Челябинский государственный университет

Соколовский Владимир Владимирович, д.ф.-м.н.

[eragerk@rambler.ru](mailto:eragerk@rambler.ru)

В последние годы магнитные сплавы с эффектом памяти формы привлекают большое внимание из-за значительных деформаций, индуцированных магнитным полем, и большого магнитокалорического эффекта, используемого в современных технологиях. Наличие больших обратимых магнитодеформаций связано с возникновением модулированных низкосимметричных структур в мартенситной фазе вследствие бездиффузионного мартенситного перехода из высокотемпературной аустенитной фазы с кубической структурой. Модулированные мартенситные структуры представляют собой периодический сдвиг атомных плоскостей решетки с определённой амплитудой и периодом, приводящий к соразмерным и несообразным орторомбическим или двойниковым моноклинным структурам. Несмотря на то, что многие стехиометрические сплавы  $Ni_2MnX$  имеют серьезные ограничения в их полноценном применении, связанные с рабочим температурным интервалом, поскольку температура Кюри достаточно велика, то управление температурами мартенситного и магнитного перехода можно реализовать посредством введения нестехиометрии.

В данной работе первопринципные вычисления модулированных структур сплавов  $Ni_2Mn_{1.75}In_{0.25}$  с расположением атомов Mn в «шахматном» и «послойном» порядке были выполнены с помощью теории функционала плотности, реализованной в программном пакете VASP (Vienna Ab initio Simulation Package) [1], в приближении GGA-PBE [2]. Плотность к сетки, применявшейся для геометрической оптимизации составляла ~15000 точек на атом обратной решетки. Энергия обрезки плоских волн составляла 460 eV, а параметр сходимости по энергии равнялся  $10^{-8}$  eV/атом.

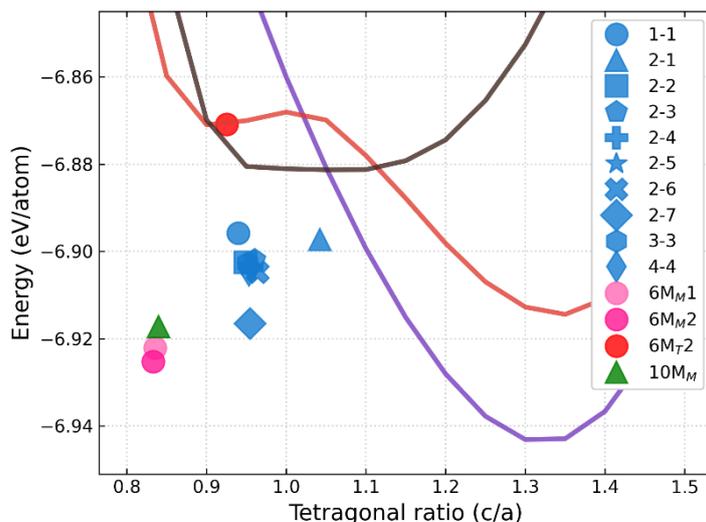


рис.1. Зависимость энергии основного состояния от тетрагонального искажения модулированных структур сплава  $Ni_2Mn_{1.75}In_{0.25}$  с расположением атомов в «шахматном порядке», синими символами обозначены нанодвойниковые структуры, розовыми точками - структуры 6M, зеленым треугольником - 10M

На рис.1 представлена зависимость энергии основного состояния различных модулированных структур сплава  $Ni_2Mn_{1.75}In_{0.25}$  от тетрагонального искажения (c/a). По полученным данным, модулированные моноклинные структуры 6M демонстрируют большую устойчивость, относительно структур с расположением атомов в шахматном порядке. Структуры с расположением атомов в послойном порядке демонстрируют неустойчивое поведение и, после геометрической оптимизации, наблюдается переход в фазу немодулированного мартенсита  $L1_0$ .

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 17-72-20022.

Список публикаций:

[1] Kresse G., Furthmüller J. // *Physical Review B*. 1996. V. 54. P. 11169.

[2] Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. // *Physical Review Letters*. 1996. V. 77. P. 3865.

## Исследование анизотропии в пленках $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$

Жидель Карина Михайловна

Южный федеральный университет

Павленко Анатолий Владимирович, д.ф.-м.н.

[karinagidele@gmail.com](mailto:karinagidele@gmail.com)

В современном материаловедении стали актуальными вопросы получения и исследования свойств тонкослойных гетероструктур на основе сегнетоэлектрических материалов, в частности, ниобатов бария-стронция  $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ . В эпитаксиальных прозрачных пленках, ориентированных в направлении оптической оси  $c$  одноосного кристалла, фактор анизотропии приводит к дополнительным изменениям в трактовке результатов эллипсометрических измерений.

В настоящей работе представлены результаты эллипсометрических исследований тонких пленок ниобатов бария-стронция  $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$  (SBN-61), нанесенных на кристаллические подложки MgO (001). Пленки SBN-61 были получены методом ВЧ-катодного распыления керамической мишени на предварительно подготовленные под гетероэпитаксиальное осаждение монокристаллические подложки MgO (001). Время напыления SBN-61 на MgO составило 115 мин. Для определения оптических параметров нами были проведены спектральные исследования методом эллипсометрии. Измерения проводились на спектральном эллипсометре «ЭЛЛИПС-1991». ЭЛЛИПС-1991 создан на основе статической измерительной схемы. Спектры эллипсометрических параметров  $\psi$  и  $\Delta$  измерялись в диапазоне от 350 до 1000 нм с шагом 2 нм. Образцы устанавливались на прецизионном вращающемся столике для выполнения измерений в зависимости от азимута, а угол поворота в плоскости  $\phi$  изменялся от 0 до 90°. При каждой ориентации в плоскости данные снимались под углами падения (45°-65°). Такая схема измерения с угловым разрешением необходима для полной характеристики произвольных оптически анизотропных образцов.

На рис. 1 представлены экспериментальные спектры эллипсометрических параметров  $\psi$  и  $\Delta$  в видимом диапазоне. Спектры построены для угла падения зондирующего луча 45° и ориентациях в плоскости для положения условного нуля и поворота на 45°. Видно, что образцы SBN-61 не демонстрируют анизотропного оптического поведения, о чем свидетельствуют совпадающие экспериментальные кривые.

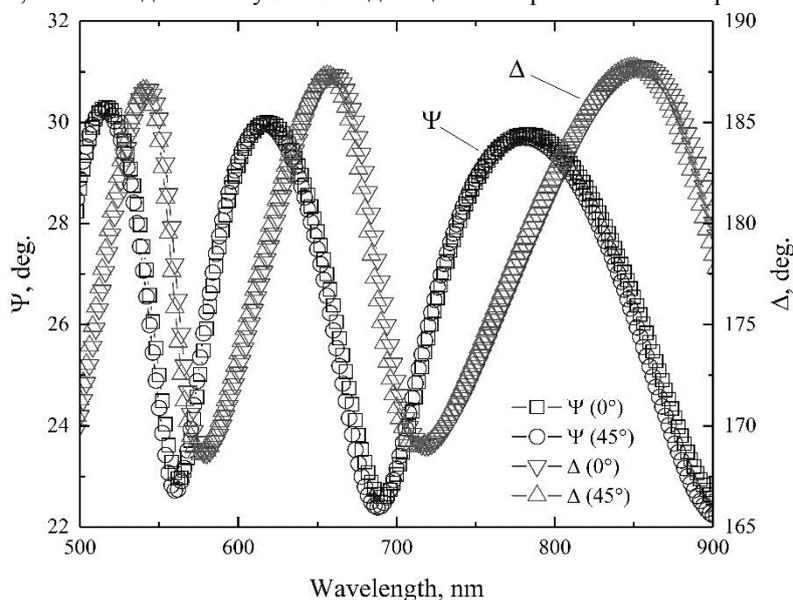


рис.1. Зависимости  $\Psi$  и  $\Delta$  как функции длины волны

Эллипсометрические измерения показали, что все исследованные SBN-пленки характеризуются естественным направлением роста, которое совпадает с направлением оптической оси  $c$  кристалла. Таким образом, поворот плоскости падения зондирующего луча не приводит к изменению значений  $\psi$  и  $\Delta$ . Исследуемые пленки можно рассматривать в рамках изотропной модели.

Благодарности. Использовано оборудование ЦКП «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)».

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № (0852-2020-0032)/(БАЗ0110/20-3-07ИФ)).

## Особые участки теплового расширения эпитаксиальной пленки со структурой феррит-граната

*Максимов Глеб Сергеевич*

*Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского*

*Максимова Елена Михайловна, к.ф.-м.н.*

*[neondreamer00@gmail.com](mailto:neondreamer00@gmail.com)*

Структурное совершенство феррит-гранатовых пленок во многом определяет конечные свойства разрабатываемых устройств [1]. Основными причинами возникновения напряжений в монокристаллических пленках являются несоответствие параметров решетки пленки и подложки, различие их коэффициентов теплового расширения, возникновение спонтанной деформации при фазовом переходе [2]. Поэтому исследования тепловых свойств пленок как одной из причин появления в них внутренних напряжений по-прежнему остаются актуальной задачей.

В работе исследовалась эпитаксиальная феррит-гранатовая пленка  $(\text{BiGdLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ , выращенная методом жидкофазной эпитаксии из раствора в расплаве, на подложке из галлий-гадолиниевого граната  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  кристаллографической ориентации (111). Структурные исследования проводились на рентгеновском дифрактометре XRD 7000 Shimadzu. Съемка производилась в  $\text{Cu K}\alpha$ -излучении с использованием графитового монохроматора в высокотемпературной камере Shimadzu при температурах 20, 100, 200, 300, 400, 500 °C.

Параметры элементарных ячеек пленки и подложки были рассчитаны по следующей формуле для кристаллов кубической сингонии:

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения;  $\theta$  – угол Брегга;  $h, k, l$  – индексы интерференции.

График зависимости параметров элементарных ячеек пленки и подложки от температуры представлен на рис. 1.

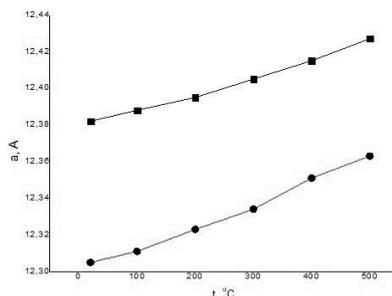


рис. 1. Температурные зависимости параметров элементарных ячеек пленки (кружки) и подложки (квадраты).

Для количественной оценки термического расширения образца были рассчитаны коэффициенты теплового расширения (КТР) пленки и подложки по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta l/l}{\Delta T} = \frac{1}{a_0} \frac{\Delta a}{\Delta t} \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – разность температур в конце и начале температурного интервала;  $\Delta a$  – разность параметров элементарных ячеек в конце и начале температурного интервала;  $a_0$  – значение параметра в начале температурного интервала.

Результаты расчетов приведены в следующей таблице.

$t_{\text{нач.}} - t_{\text{кон.}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	20 - 100	100 - 200	200-300	300-400	400-500
$\alpha_{\text{пленки}}, \cdot 10^{-6}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	5,99	9,83	8,85	13,20	10,3
$\alpha_{\text{подложки}}, \cdot 10^{-6}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	5,65	5,97	7,83	7,82	10,55
$\alpha_{\text{пленки}}/\alpha_{\text{подложки}}, \cdot 10^{-6}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	1,06	1,65	1,1	1,69	0,98

Из таблицы видно, что для ряда температурных интервалов КТР пленки и подложки практически равны, в то время как на интервалах 100-200 °C и 300-400 °C коэффициент теплового расширения пленки в 1,7 раза больше, чем у подложки. Такая разница в тепловом расширении пленки и подложки очевидно связана с тем,

что в этих температурных интервалах происходит изменение магнитного порядка в структуре пленке. А именно, в обращении в ноль намагниченности феррит-граната при температуре компенсации и температуре Кюри.

В работе использовался образец феррит-гранатовой пленки, выращенной в Научно-исследовательском центре Функциональных материалов и нанотехнологий Физико-технического института Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского.

Список публикаций:

[1] Y.H. Kim, J.S. Kim, S.I. Kim, M.J. Levy *Korean Phys. Soc.*, 43 (3), 400-405 (2003).

[2] A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov, A.V. Karavainikov, V.N. Berzhansky, T.A. Mikhailova, V.A. Kotov, D.E. Balabanov, I.V. Sharay, O.Y. Salyuk, M. Vasiliev, V.O. Golub *Materials Research Bulletin.*, 55., 19–25 (2014).

## Формирование структурных фрагментов в дихалькогенидах титана, замещённых 3d-переходными металлами

*Меренцов Александр Ильич*

*Шкварин Алексей Сергеевич, Титов Александр Натанович*

*Институт физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева*

*[Alexander.Merentsov@urfu.ru](mailto:Alexander.Merentsov@urfu.ru)*

Слоистые дихалькогениды переходных металлов (СДПМ) с общей формулой  $MCh_2$  ( $Ch = S, Se, Te$ ) представляют собой квазидвумерные материалы с чередующимися слоями  $Ch-M-Ch$ . Внутри слоёв химическая связь имеет преимущественно ковалентный характер, в то время как между слоями связь относительно слаба, что даёт возможность к получению так называемых интеркалатных материалов, в которых примесь попадает в межслоевое пространство. При этом образуются дополнительные связи между интеркалантом и решёткой-матрицей, а при высокой концентрации интеркаланта могут образовываться связи непосредственно между атомами интеркаланта (как, например, в системе  $Fe_xTiSe_2$  [1]), приводя к их упорядочению в виде одномерных атомных цепочек. Многообразие комбинаций интеркалант-матрица даёт возможность варьировать свойства интеркалированных СДПМ в широком диапазоне.

Ещё одним способом модификации свойств СДПМ является замещение по одной из подрешёток (переходного металла [2-4] или халькогена [5]). При таком допировании не образуются дополнительные связи между примесью и решёткой в направлении, перпендикулярном плоскости слоёв, что, в частности, не приводит к подавлению эффективного магнитного момента примеси, если она является магнитной, а также позволяет сохранить относительную слабость взаимодействия между соседними слоями  $Ch-M-Ch$ . Такого рода материалы удобны для использования в качестве твёрдых электролитов для литиевых батарей, поскольку замещение существенно снижает предел растворимости лития и увеличивает ионную подвижность.

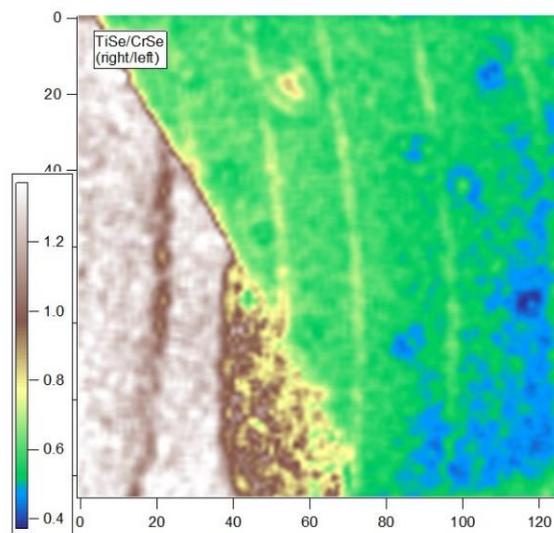


рис. 1. Поверхность  $100 \times 100$  мкм монокристалла  $Cr_{0.78}Ti_{0.36}Se_2$  в контрасте Se 3d. Цветом показана относительная интегральная интенсивность, значения по осям  $x$  и  $y$  – пиксели.

В монокристаллах замещённой системы  $\text{Cr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Se}_2$  методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в кристалле с  $x = 0.83$  было обнаружено [3] два пика Se 3d: один соответствовал селену в матрице  $\text{TiSe}_2$ , другой же имел энергию связи на 1.3 эВ больше. Появление второго пика интерпретировалось как образование в материале слоёв  $\text{CrSe}_2$ , когерентно связанных с матрицей  $\text{TiSe}_2$ . Прямого подтверждения этому, однако, до последнего времени не было. Непосредственно подтвердить наличие структурных фрагментов удалось используя методику SPEM (Scanning Photoemission Electron Microscopy), реализованной на линии Spectromicroscopy синхротрона ELETTRA (г. Триест, Италия). Благодаря фокусировке размер пучка достигает диаметра 120 нм, что позволяет исследовать наноразмерные включения. На *рис. 1* представлено изображение поверхности  $100 \times 100$  мкм монокристалла  $\text{Cr}_{0.78}\text{Ti}_{0.36}\text{Se}_2$  в контрасте Se 3d. Левый фрагмент – решётка на основе  $\text{TiSe}_2$ , правый фрагмент – решётка на основе  $\text{CrSe}_2$ . Аналогичные структурные фрагменты образуются и в монокристаллах системы  $\text{V}_x\text{Ti}_{1-x}\text{Se}_2$  в составе с  $x = 0.75$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60031.

Список публикаций:

- [1] Shkvarin A.S., Yarmoshenko Yu.M., Merentsov A.I., Shkvarina E.G., Suslov E.A., Brezhestovsky M.S., Bushkova O.V., Titov A.N. // *RSC Advances*. 2016. ЖЭТФ. 2003. 6. 106527.  
 [2] Shkvarin A.S., Merentsov A.I., Yarmoshenko Yu.M., Shkvarina E.G., Zhukov Yu.M., Titov A.A., Titov A.N. // *Journal of Chemical Physics*. 2017. 146. 164703.  
 [3] Merentsov A.I., Yarmoshenko Yu.M., Skorikov A.N., Titov A.N., Buling A., Råkers M., Neumann M., Galieva E.G., Slepudin P.A. // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2010. 182. 70.  
 [4] Kirby R. D., Freund G. A., Fagerquist R. L. // *Bull. Am. Phys. Soc.* 1980. 25. 201.  
 [5] Shkvarin A.S., Merentsov A.I., Titov A.A., Yarmoshenko Yu.M., Shkvarina E.G., Pis I., Nappini S. Titov A.N. // *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. 6. 12592.

## Электрофизические характеристики твёрдых растворов системы PZT-CdNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>

Мойса Максим Олегович

Андрюшин Константин Петрович, Саху Сушрисангита, Воробьёв Артём Алексеевич

Южный федеральный университет

Резниченко Лариса Андреевна

[moysa@sfedu.ru](mailto:moysa@sfedu.ru)

В настоящее время пьезоэлектрические материалы, преобразующие энергию между электрической и механической формами, используются для контроля динамических процессов в качестве первичных преобразователей информации. В качестве основы вышеуказанных наиболее перспективны и привлекательны среды с особыми электрическими свойствами, прежде всего, сегнетопъезокерамики со структурами типа перовскита и родственных, обладающие рядом уникальных характеристик (высокие значения пьезооткликов, стабильность свойств при воздействии внешних критических воздействий). Ввиду того, что пьезоэлектрические и диэлектрические свойства являются фундаментальными характеристиками таких объектов, актуальным представляется проследить влияние состава на электрофизические характеристики в твёрдых растворах (ТР) системы  $(1-x)\text{Pb}(\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_{3-x}\text{Cd}_{0.5}\text{NbO}_3$ .

Объектом исследования явились ТР системы  $(1-x)\text{Pb}(\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_{3-x}\text{Cd}_{0.5}\text{NbO}_3$  с  $x = 0.0125 - 0.5$ ,  $\Delta x = 0.0125$ . Образцы получены твердофазным синтезом в две стадии с последующим спеканием по обычной керамической технологии:  $T_{\text{синт.1}} = 1170$  К,  $\tau_{\text{синт.1}} = 4$  ч.,  $T_{\text{синт.2}} = 1220$  К,  $\tau_{\text{синт.2}} = 10$  ч.,  $T_{\text{спек.}} = 1490$  К, в зависимости от состава. Электрофизические параметры поляризованных образцов при комнатной температуре измерялись с помощью LCR-meter Agilent 4980A методом резонанса-антирезонанса [1]. Определяли относительные диэлектрические проницаемости неполяризованных ( $\epsilon/\epsilon_0$ ) и поляризованных ( $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ ) образцов, пьезоэлектрический модуль,  $|d_{31}|$ , пьезоэлектрический коэффициент (пьезоэлектрическая чувствительность),  $|g_{31}|$ , коэффициент электромеханической связи планарной моды колебаний,  $K_p$ . Пьезомодуль  $d_{33}$  и, соответственно, пьезоэлектрический коэффициент  $g_{33}$  измеряли при комнатной температуре квазистатическим методом при помощи прибора Piezo  $d_{33}$  Test System (YE2730A  $d_{33}$  METER).

На *рис. 1* представлены диэлектрические, пьезоэлектрические и сегнетоэластические свойства ТР системы  $(1-x)\text{Pb}(\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_{3-x}\text{Cd}_{0.5}\text{NbO}_3$ . Обнаружен немонотонный ход зависимостей диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик в зависимости от состава. Так,  $|d_{33}|$  и  $g_{33}$  имеют точку перегиба при  $x = 0.025$ ,  $K_p$  – ярко выраженный минимум при  $x = 0.0375$ , а  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$  характеризуется резким ростом при переходе в псевдокубическую фазу.

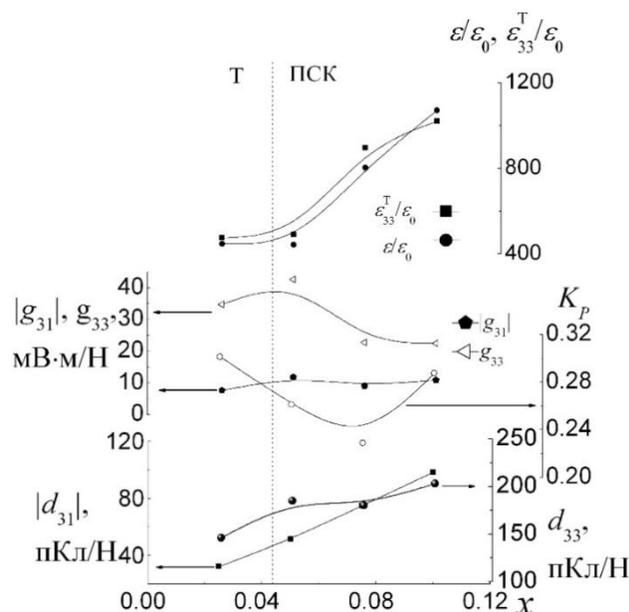


рис. 1. Зависимость пьезоэлектрических и сегнетоэластических свойств TP системы  $(1-x)Pb(Ti_{0.5}Zr_{0.5})O_{3-x}Cd_{0.5}NbO_3$  с  $x = 0.0125 - 0.05$

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № (0852-2020-0032)/(БА30110/20-3-07ИФ)

Список публикаций:

[1] ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. // Введены 01.01.88. Группа Э-10. -41с

## Электрофизические свойства кремния при высоких давлениях

*Никулин Андрей Алексеевич*

*Тебеньков Александр Владимирович*

*Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина*

*Тебеньков Александр Владимирович*

*[Eternalenvy123@gmail.com](mailto:Eternalenvy123@gmail.com)*

В нашем исследовании предпринята попытка определить границы фазовых переходов в кремнии в диапазоне давлений 16–50 ГПа в зависимости от скорости увеличения давления.

Кремний давно исследуется при высоких давлениях, известно около двенадцати фаз высокого давления. Несмотря на это, до сих пор межфазные границы в диапазоне 30–40 ГПа точно не определены, и различные авторы по-разному указывают эти границы в зависимости от условий эксперимента. На сегодняшний день фазовая диаграмма кремния в диапазоне 16-50 ГПа выглядит приблизительно следующим образом: с 16 до 32 ГПа – это простая гексагональная структура Si-V, с 36 до 42 ГПа – изоструктурный тип Cs V Si-VI и при давлении выше 48 ГПа – гексагональная плотноупакованная Si-VII [1].

Для генерации высоких давлений использована камера высокого давления с токопроводящими наковальнями, изготовленными из синтетического поликристаллического алмаза. Межкристаллитные области данного материала заполнены металлической связкой, обеспечивающей низкое электрическое сопротивление наковален. Это позволяет изучать электрические характеристики вещества в широком диапазоне давлений. Рабочий диапазон давлений для камеры составляет от 16 до 50 ГПа.

В ходе эксперимента проводилось измерение электросопротивления кремния при фиксированных давлениях с выдержкой в течение 2 минут. На (рис.1) представлена барическая зависимость электросопротивления кремния в полулогарифмических координатах. На графике показаны четыре полных цикла увеличения и снижения давления для одного и того же образца. Два цикла с шагом 0.5 ГПа и по одному циклу с шагом 1 ГПа и 2 ГПа соответственно. Для шага 0.5 ГПа можно выделить 3 линейных участка в диапазонах давлений 16–29 ГПа, 37–44 ГПа, выше 44 ГПа, что с небольшим различием согласуется с

литературой. В свою очередь, по мере увеличения шага до 1 ГПа и 2 ГПа наблюдается заметное снижение количества резких скачков электросопротивления и весь график приблизительно стремится к одной монотонной близкой к линейной зависимости, что особенно видно при шаге в 2 ГПа, где не наблюдается резких скачков электросопротивления. Это связано с тем, что по мере увеличения шага требуется больше времени для протекания релаксационных процессов.

Таким образом, по результатам исследования был установлен факт, что скорость увеличения давления влияет на то, при каких давлениях регистрируются границы фазовых переходов.

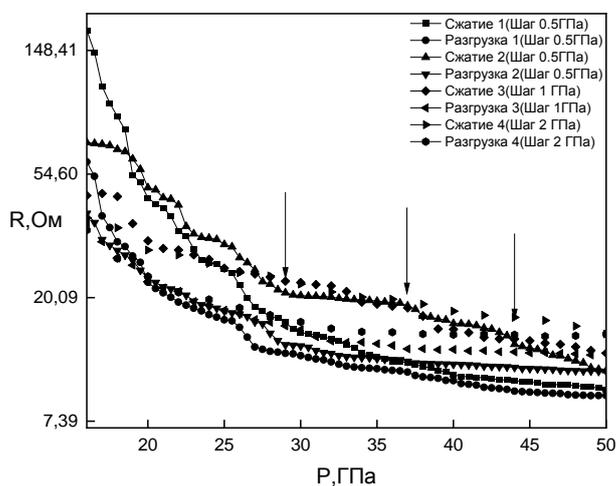


рис.1 – Барические зависимости электросопротивления кремния. Стрелочками обозначены точки, в которых ожидаются фазовые переходы

Список публикаций:

[1] Тебеньков А.В., Г.В. Суханова, А.Н.Бабушкин Фазовые переходы и время релаксации проводимости в кремнии // Известия Уфимского научного центра РАН - 2021. - №2. - С. 30–32.

## Электронная структура и химическая связь в $\text{BeAP}_2$ (A=C, Si)

Поляков Савелий Викторович

Кемеровский государственный университет

Гордиенко Алексей Болеславович, д.ф.-м.н.

[savelij.polyakov@mail.ru](mailto:savelij.polyakov@mail.ru)

Целью настоящей работы является систематическое исследование электронных свойств гипотетических соединений  $\text{BeAP}_2$  (A=C, Si) со структурой халькопирита (пространственная группа  $I-42d$ ), которые представляют интерес, как перспективные полупроводниковые соединения.

Вычисления выполнялись в локальном приближении теории функционала плотности [1-3] с использованием сохраняющих норму, сепарабельных HGH-псевдопотенциалов [4], базиса псевдо-атомных орбиталей [5, 6] в форме *triple- $\zeta$*  функций *s*-, *p*- и *d*-типа для всех атомов, а также **k**-сетки размерности 4x4x4 для интегрирования по зоне Бриллюэна. Полная оптимизация кристаллической структуры, включая параметры решетки и координаты атомов, выполнялась методом VFGS [7]. Ниже кратко представлены результаты для кристалла  $\text{BeSiP}_2$ .

Оптимизированные значения постоянных решетки  $\text{BeSiP}_2$  составляют  $a = 5.048 \text{ \AA}$ ,  $c = 10.077 \text{ \AA}$ , соответственно величина тетрагонального сжатия  $\gamma = c/a = 1.996$  практически совпадает с идеальным значением 2.0 для удвоенной решетки сфалерита. Равновесные длины неэквивалентных связей Be-P и Si-P равны Be-P 2.1303 и 2.2413  $\text{ \AA}$ , что определяет величину параметра смещения анионов  $x = 0.231$ .

Зонная структура  $\text{BeSiP}_2$  и плотность состояний приведены на рис.1(а, б). Как видно, рассматриваемый кристалл является полупроводником, при этом вершина валентной зоны реализуется в центре зоны Бриллюэна (точка  $\Gamma$ ), а конкурирующие минимумы зоны проводимости располагаются в точках  $\Gamma$  и T с практически

равными энергиями переходов, которые составляют 0.97 эВ. Структура валентной зоны  $\text{BeSiP}_2$ , содержащей 16 подзон, имеет вид, характерный для полупроводниковых соединений и состоит из трех полос электронных состояний, из которых две слегка перекрываются в области энергий порядка -7.0 эВ. Анализ проектированной плотности состояний показывает, что по типу атомных вкладов все группы зон имеют смешанный характер, при этом для первой и третьей зон характерны большие вклады состояний атомов бериллия и фосфора, в то же время, как наиболее заметный вклад состояний атомов кремния наблюдается в пределах второй подзоны в интервале энергий от -6.0 до -8.0 эВ.

Распределение полной валентной и деформационной электронной плотности в плоскости  $(1\bar{1}0)$   $\text{BeSiP}_2$  показано на рис. 1(в, г). Основной заряд сосредоточен на атомах фосфора и кремния, при этом форма электронного облака на атомах фосфора близка к сферической, но заметно деформирована в направлении атомов бериллия и кремния, что указывает на формирование ковалентных связей Be-P и Si-P. В то же время, максимальные значения заряда сильно смещены в сторону атомов фосфора.

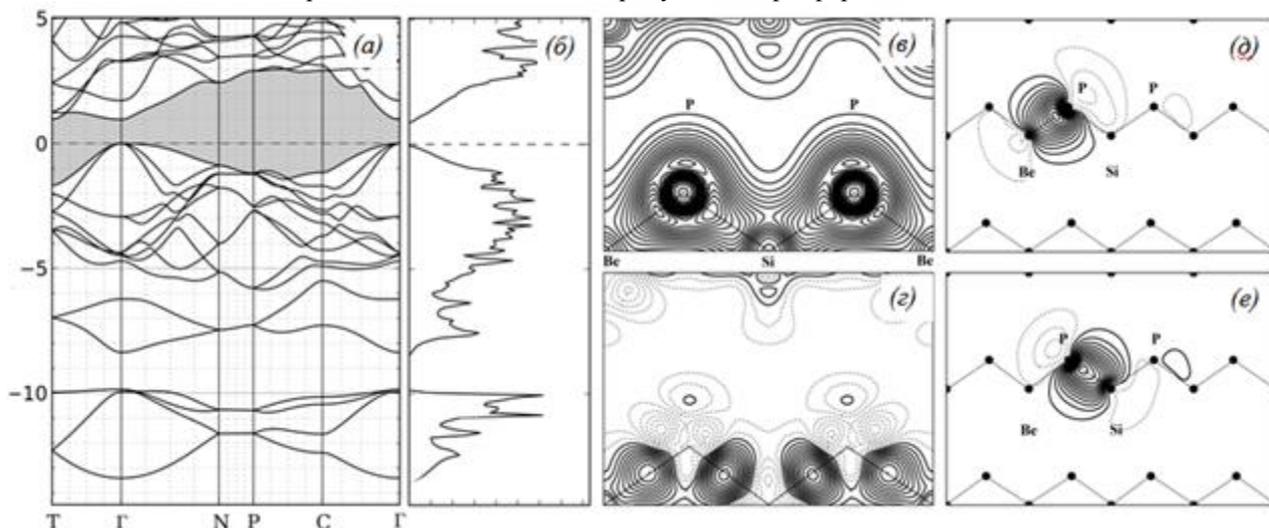


рис. 1.  $\text{BeSiP}_2$ : зонная структура (а), плотность состояний (б), полная валентная (в), деформационная (г) плотность заряда, функции Ванье связей Be-P (д) и Si-P (е).

Аналогичные особенности можно наблюдать также и на картине деформационной плотности заряда ( $\delta\rho$ ): избыточный заряд присутствует на линии Be-P, где он имеет слегка асимметричную форму и максимум, смещенный в сторону атома фосфора, а также на линии Si-P вдоль которой  $\delta\rho$  имеет профиль характерный для ковалентных связей. Таким образом, химическая связь в  $\text{BeSiP}_2$  имеет преимущественно ковалентный характер, но с заметной долей ионной составляющей, характерной для связи Be-P. Более детальные выводы о характере химической связи можно сделать на основе исследования структуры функций Ванье (ФВ). Вычисления, выполненные для всех валентных зон, приводят к 16 ФВ, из которых независимыми являются только две, отвечающие связям Be-P и Si-P, рис.1(д, е), а остальные связаны с указанными преобразованиями группы симметрии тетраэдра. Как видно, ФВ имеют форму  $sp^3$  гибридных орбиталей, что характерно для ковалентных соединений с тетраэдрической координацией, при этом ФВ связи Be-P более компакта, чем ФВ связи Si-P.

В работе также вычислены поляризованные спектры мнимой части диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_2(E)$ ), анализ которых показывает, что амплитуды минимальных переходов достаточно малы, либо обращаются в ноль по симметрии, а заметное поглощение начинается с энергий порядка 2.0 эВ. При этом, профили  $\varepsilon_2(E)$  для разных направлений поляризации света оказываются достаточно близкими, включая особенности и пики, которые формируются в основном за счет прямых переходов в центре зоны Бриллюэна.

Список публикаций:

- [1] Hohenberg P., Kohn W. // *Phys. Rev.* 1964. V.63. №3. P.864-871.
- [2] Kohn W., Sham L.J. // *Phys. Rev.* 1965. V.140. P. A1133-1138.
- [3] Perdew J. P., Zunger A. // *Phys. Rev. B.* 1981. V. 23. P. 5048-5079.
- [4] Hartwigsen C., Goedecker S., Hutter J. // *Phys. Rev. B.* 1998. V.58. №7. P.3541-3662.
- [5] Jansen R. W., Sankey O. F. // *Phys. Rev. B.* 1987. V. 36. P. 6520-6531.
- [6] Gordienko A.B., Poplavnoi A.S. // *Phys. Stat. Sol.(b)* 1997. V.202. P.941-949.
- [7] J. Nocedal and S. J. Wright. *Numerical Optimization. Springer Series in Operations Research.* Springer. 1999, 634 P.

## Влияние давления в системе сплавов Гейслера Ni<sub>2</sub>MnX (X = Ga, In, Sn, Sb)

Раев Андрей Александрович

Байгутлин Данил Расулович, Ерагер Ксения Романовна, Бучельников Василий Дмитриевич

Челябинский государственный университет

Соколовский Владимир Владимирович, д.ф.-м.н.

[landrew637@mail.com](mailto:landrew637@mail.com)

В настоящее время большие усилия научных групп во всем мире направлены на создание и интенсивное изучение новых функциональных материалов. Интерес к таким материалам вызван, прежде всего, поиском новых физических свойств, которые могут быть использованы в современных технологиях. При магнитоструктурных фазовых переходах наиболее ярко проявляется связь между кристаллической решеткой и магнитной спиновой подсистемой, что приводит к одновременному изменению структуры и магнитных свойств под действием внешних параметров (давление, магнитное поле, температура) и проявлению таких эффектов, как гигантское магнитосопротивление, магнитокалорический эффект, магнитоуправляемый эффект памяти формы [1,2] и др.

Исследование влияния внешнего давления на систему сплавов Гейслера Ni<sub>2</sub>MnX (X = Ga, In, Sn, Sb) при максимальном значении P = 30 ГПа для 4-атомной суперячейки проводилось с помощью программного пакета VASP (Vienna Ab initio Simulation Package) [3] в приближении функционалов PBE [4] и SCAN [5]. Интегрирование зоны Бриллюэна проводилось на сетке Монхорса-Пака (15x15x15). Энергия обрезки плоских волн составляла 450 eV, а параметр сходимости по энергии равнялся 10<sup>-7</sup> eV/атом.

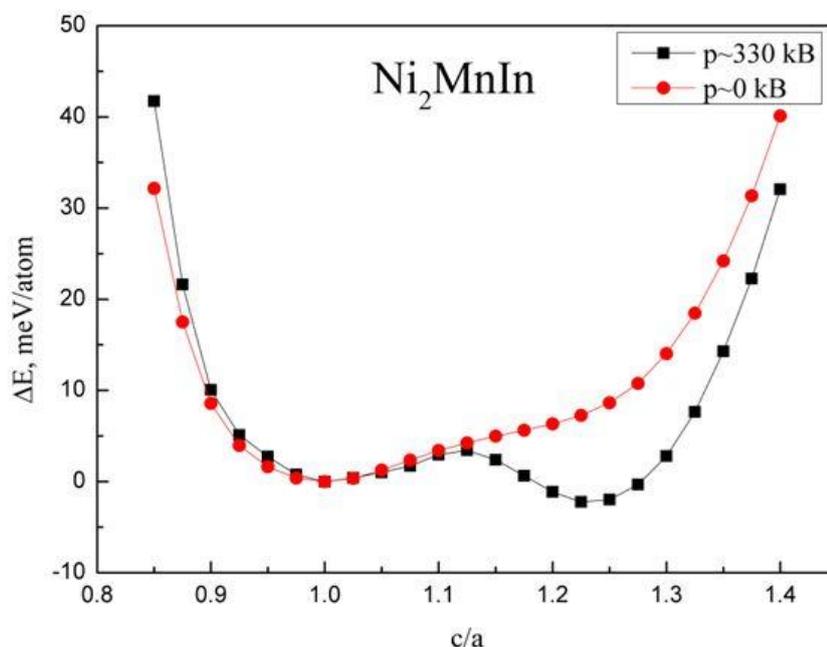


рис. 1. Зависимость энергии основного состояния от тетрагонального искажения сплава Ni<sub>2</sub>MnIn без воздействия давления и при приложенном внешнем давлении 330 кБ

На рис.1 представлена зависимость энергии основного состояния кубической и тетрагональной фазы сплава Ni<sub>2</sub>MnIn без воздействия давления и при приложенном внешнем давлении. По данным расчётов, наблюдается практическое вырожденное состояние аустенитной и мартенситной фазы при внешнем воздействии давления на структуру.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 17-72-20022.

Список публикаций:

[1] Koshkid'ko, Y.S. // JMMM. 2017. V. 433. P. 234- 238.

[2] Pecharsky, V.K. // J. Appl. Phys. 1999. V. 86. P. 565–575.

[3] Kresse G., Furthmüller J. // Physical Review B. 1996. V. 54. P. 11169.

[4] Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. // Physical Review Letters. 1996. V. 77. P. 3865.

[5] Sun, J., Ruzsinszky A., Perdew J. P. // Phys. Rev. B. 2015. V. 115. 036402

# Исследование из первых принципов структурных свойств сплавов Гейслера на основе $\text{Co}_2\text{Ni}_{1+x}\text{Z}_{1-x}$ ( $Z=\text{Al, Ga, In, Sn}$ )

Саносян Артур Азатович

Соколовский Владимир Владимирович, Бучельников Василий Дмитриевич

Челябинский государственный университет

Соколовский Владимир Владимирович, д.ф.-м.н.

[arthursanosyan@mail.ru](mailto:arthursanosyan@mail.ru)

Функциональные сплавы Гейслера на основе Co являются перспективными с точки зрения создания постоянных магнитов [1] в силу их низкой стоимости и конкурентоспособности с современными постоянными магнитами на редкоземельных элементах, таких как (Dy, Nd) [2]. В связи с этим перед фундаментальной наукой стоит задача поиска новых высокоэнергетических, без редкоземельных, - магнитотвердых материалов. Их уникальность объясняется высокими показателями намагниченности и магнитной анизотропии, благодаря сильному спин-орбитальному взаимодействию.

В данной работе рассмотрены сплавы Гейслера семейства  $\text{Co}_2\text{Ni}_{1+x}\text{Z}_{1-x}$  ( $Z = \text{Al, Ga, In, Sn}$ ). Исследования из первых принципов выполнены с помощью программного пакета «VASP» [3,4]. Расчеты магнитных и структурных свойств проведены для супер-ячейки, состоящей из 16 атомов, в приближении обобщенного градиента электронной плотности (GGA-PBE). В качестве кристаллической структуры аустенитной и мартенситной фазы рассмотрено пять кристаллических мотивов с различным атомным упорядочением (рис. 1). В результате рассчитаны равновесные состояния для каждой структуры с различным соотношением атомов Ni и Z, где ( $Z = \text{Al, Ga, In, Sn}$ ). Показано, что соединения с In и Sn оказались энергетически невыгодными вследствие положительного значения энергии формирования. Для устойчивых соединений получены зависимости энергии кристалла от параметра решетки и степени тетрагонального искажения  $c/a$  (рис.2.).

На примере сплавов Co-Ni-(Al, Ga) из (рис.2.) видно, что обычная  $L2_1$  структура невыгодна по энергии формирования и не может конкурировать с остальными рассматриваемыми композициями. Отсутствие минимумов при  $c/a = 1$  позволяет сделать вывод, что аустенитные структуры этих соединений будут нестабильны. Мартенситные фазы, напротив, оказались устойчивы во всех рассмотренных случаях, которые демонстрируют минимальную энергию формирования при  $c/a > 1$ . Для сплава  $\text{Co}_2\text{NiAl}$  обратная структура наиболее выгодна с  $c/a = 1.292$ , в то время с увеличением избытка Ni энергетически выгодной становится  $T^p$  структура с более высоким тетрагональным искажениями  $c/a = 1.380$  при  $x = 0.25$  и  $0.5$ .

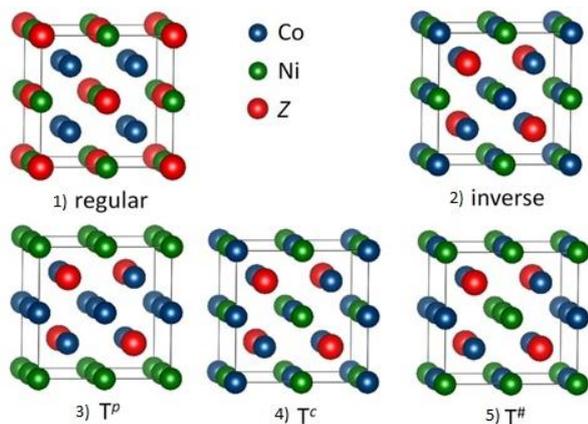


рис.1. Типы рассматриваемых кристаллических структур.

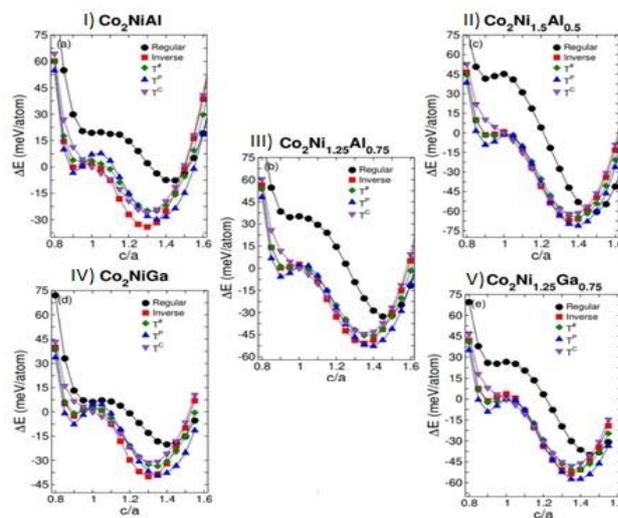


рис.2. Зависимость энергии кристалла  $\text{Co}_2\text{Ni}_{1+x}\text{Z}_{1-x}$  ( $Z=\text{Al, Ga}$ )

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 075-01391-22-00.

Список публикаций:

- [1] A. Planes et al. // *J.Phys.: Condens. Matter*. 2009. Vol. 21. 233201.
- [2] M.J. Kramer, R.W. McCallum, I.A. Anderson, S. Constantinides // *JOM*. 2012. Vol. 64, 752.
- [3] G. Kresse and J. Furthmüller // *Phys. Rev. B*. 1996. Vol. 54. 11169.
- [4] G. Kresse and D. Joubert // *Phys. Rev. B*. 1999. Vol. 59. 1758.

**Расчет зонной структуры  $\text{AgCrS}_2$**   
**Сафаргалиев Данир Ильдарович**  
*Латыпова Айназ Рамзиловна*  
**Башкирский государственный университет**  
*Давлетишина Алиса Данисовна*  
[davletshinaalisa@rambler.ru](mailto:davletshinaalisa@rambler.ru)

Исследование соединений  $\text{AgCrS}_2$  представляет большой интерес с точки зрения магнитных свойств, электронной и ионной проводимостей, высокотемпературной сверхпроводимости, термоэлектрических свойств и других [1-4]. Характерной особенностью данных соединений является то, что одновалентные ионы обладают высокой подвижностью в базисных плоскостях гексагональной решетки и явление суперионной проводимости имеет двумерный характер. Двумерный суперионный проводник  $\text{AgCrS}_2$  при температуре 300 К и 673 К имеют гексагональную структуру (R3m).

Рассмотрим зонную структуру  $\text{AgCrS}_2$  при температуре 300 и 673 К (рис. 1 а, б). Согласно парциальной и полной плотности состояний в зависимости энергии от волнового вектора для данных соединений наблюдается spd-гибридизация энергетических уровней. При изменении температуры наблюдается изменение ширины запрещенной зоны. При  $T = 300$  К ширина запрещенной зоны имеет значение 0,23 эВ, а при  $T = 673$  К - 0,16 эВ в точке Г и А. В направлении Г-М имеет место пересечение зоной проводимости уровня Ферми, образованной p- и d-состояниями Cr с незначительным вкладом s-, p-состояний Ag и s-, p-состояний S.

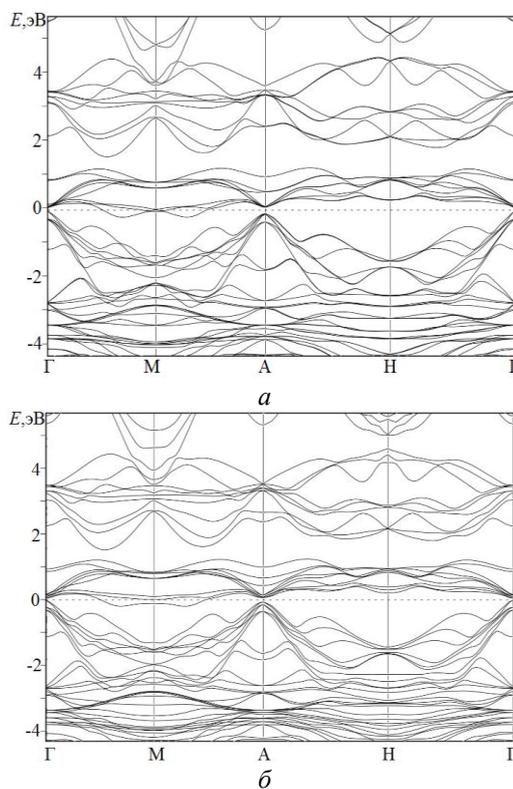


рис.1. Зонная структура  $\text{AgCrS}_2$  при температуре а) 300 К; б) 673 К

На основе полученных результатов расчета можно сделать вывод о том, что соединение  $\text{AgCrS}_2$  в высокотемпературной фазе является полупроводником с непрямым переходом. При повышении температуры наблюдается уменьшение ширины запрещенной зоны. Химическая связь в соединении  $\text{AgCrS}_2$  имеет преимущественно ковалентный характер.

Список публикаций:

- [1] Акманова Г.Р., Биккулова Н.Н., Давлетишина А.Д. // *Электрохимия*. 2013. Т. 49. № 8. С. 921.
- [2] Ушаков А.В.: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2018. 149 с.
- [ ] Srivastava D., Tewari G.C., Karppinen M., Nieminen R.M. // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2013. V. 23. P. 105504.
- [ ] Васильева И.Г., Кардаш Т.Ю., Малахов В.В. // *Журнал структурной химии*. 2009. Т. 50. № 2. С. 302.

## Пленки диоксида олова, полученные ВЧ-магнетронным напылением с ионно-лучевой обработкой

Соломенникова Александра Станиславовна

Закирова Раушания Мазитовна, Федотова Ирина Витальевна, Крылов Петр Николаевич

Удмуртский государственный университет

Крылов Петр Николаевич, к.ф.-м.н.

[solomennikova@udman.ru](mailto:solomennikova@udman.ru)

В настоящее время одними из самых перспективных тонкопленочных покрытий являются прозрачные проводящие покрытия на основе оксидов металлов (цинка, олова, индия). Прозрачные проводящие покрытия (ППП) обладают высокой электропроводностью и хорошей оптической прозрачностью.

В рамках данной работы тонкие пленки  $\text{SnO}_2$  получали методом реактивного ВЧ-магнетронного напыления на модернизированной установке типа УРМ. Пленки напыляли на стеклянные подложки в смеси газов: кислород – 10% и аргон – 90%, рабочее давление газовой смеси составило 0,36 Па. Пленки осаждали на подложки без нагрева (при комнатной температуре, 22°C) и при температуре 200°C. Образцы были получены без ионно-лучевой обработки и с ионно-лучевой обработкой, т.е. при токах  $I_{\text{ис}} = 0, 10, 20, 30, 40, 50$  и 60 мА разряда ионного источника "Радикал М-100". Синтезированные образцы пленок подвергались отжигу при температуре 450 °С в течение 3 часов. Анализ фазовых составляющих пленок исследовали с помощью дифрактометра ДРОН-3.0 в монохроматизированном излучении  $Fe-K_{\alpha}$  с длиной волны 0,193 нм. Оптические спектры пропускания исследовали с помощью спектрофотометра СФ-56 в диапазоне от 300 до 1100 нм. Толщину пленок  $d$  определяли с помощью микроинтерферометра МИИ-4. Удельное поверхностное сопротивление пленок измеряли четырёхзондовым методом.

Образцы, полученные при температуре конденсации 200 °С, имеют более резкий край поглощения по сравнению с образцами, полученными при температуре конденсации 22 °С. Пологий край поглощения, обусловленный «хвостами» Урбаха [15], может свидетельствовать об аморфной структуре пленок, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа. Пленки  $\text{SnO}_2$ , полученные на холодных подложках являются рентгеноаморфными, а на горячих – поликристаллическими. Сопутствующая ионно-лучевая обработка пленок  $\text{SnO}_2$ , полученных при температуре конденсации 200 °С, приводит к изменению преимущественной ориентации кристаллитов. Пленки, полученные без ионно-лучевой обработки, имеют максимальное интерференционное отражение от плоскости (211). Введение ионно-лучевой обработки и увеличение тока ионного источника приводят к росту интенсивности интерференционного отражения от плоскости (110), а также вызывает смещение положения интерференционных максимумов в сторону меньших углов  $2\theta$ , т.е. вызывает увеличение параметров решётки диоксида олова. Можно предположить, что рост тока ионного источника приводит к изменению макронапряжений в системе плёнка-подложка из-за роста числа дефектов, возникающих в ходе ионно-лучевой обработки.

Толщины пленок, полученных на горячей подложке, практически не зависят от  $I_{\text{ис}}$  и находятся в диапазоне 670–770 нм, а на толщины пленок, полученных при температуре 22 °С, ток ионно-лучевой обработки оказывает заметное влияние. В этом случае  $d$  меняется в диапазоне 740 – 1110 нм.

Исследования показали, что пленки, полученные при температуре 22 °С, имеют удельное сопротивление меньшее, чем пленки, полученные при температуре конденсации 200 °С. Сопутствующая ионно-лучевая обработка пленок  $\text{SnO}_2$ , полученных при температуре конденсации 22 °С, приводит к росту удельного сопротивления пленок от  $10^{-4}$  Ом·см до  $7 \cdot 10^{-1}$  Ом·см. Удельное сопротивление пленок, полученных при температуре конденсации 200 °С, с введением ионно-лучевой обработки увеличивается от  $4 \cdot 10^{-2}$  Ом·см до 40 Ом·см (ток ионной обработки 40 мА), затем уменьшается до 7 Ом·см (ток ионной обработки 60 мА).

После хранения пленок на воздухе, спектры пропускания не изменили свой вид. При хранении удельное сопротивление для пленок, полученных при температуре 22°C, незначительно уменьшилось, кроме образца, полученного при токе ионной обработки 60 мА, для которого удельное сопротивление уменьшилось практически в 2 раза ( $3,9 \cdot 10^{-1}$  Ом·см). Наибольшие изменения при хранении наблюдались у пленок  $\text{SnO}_2$ , сформированных на горячих подложках: происходит значительное увеличение удельного сопротивления пленок; в зависимости от тока разряда ионного источника, пленки могут приобретать диэлектрические свойства. Рентгенофазовый анализ не выявил изменений в пленках при длительном хранении на воздухе.

Из рис. 1 а видно, что после термической обработки, спектры пропускания для пленок, осажденных на подложку при температуре 22 °С, изменились. Эти изменения наиболее ярко проявляются в области длин волн 350 - 650 нм, где коэффициенты пропускания пленок на заданных длинах волн (в зависимости от длины волны) возрастают до нескольких раз. Для пленок, осажденных на подложки при температуре 200 °С, изменения спектров пропускания после термической обработки не существенны (рис. 1 б).

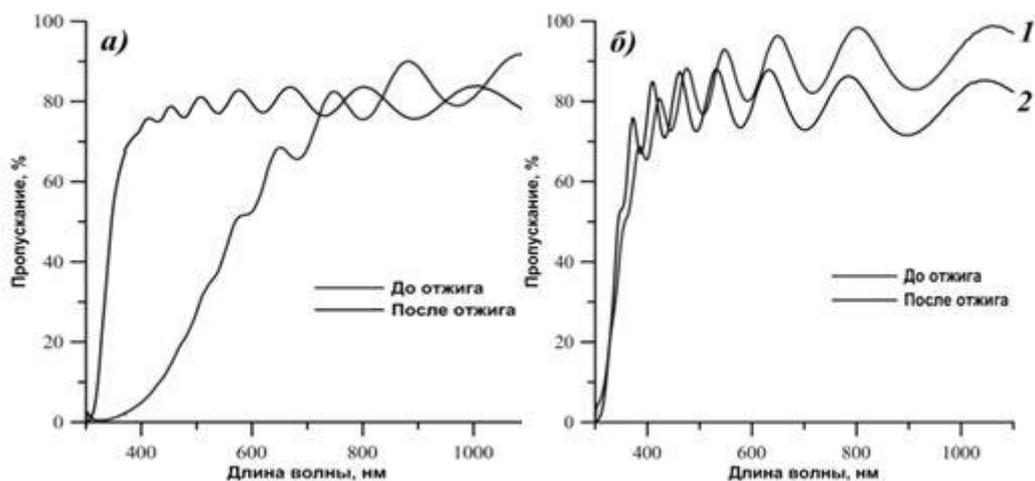


рис. 1. Спектры пропускания пленок  $\text{SnO}_2$ , полученных при температурах подложек  $22\text{ }^\circ\text{C}$  и без ионно-лучевой обработки (а) и  $200\text{ }^\circ\text{C}$  с сопутствующей ионно-лучевой обработкой при токе разряда ионного источника  $10\text{ mA}$  (б), до (кривые 1) и после отжига (кривые 2)

После термического отжига пленки, полученные при температуре осаждения  $22\text{ }^\circ\text{C}$ , стали поликристаллическими. Обнаружено появление кубической фазы  $\text{SnO}_2$  после отжига для всех пленок. Отжиг не повлиял на ориентацию кристаллитов в пленках, осажденных при температуре  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . После отжига на воздухе при температуре  $450\text{ }^\circ\text{C}$  в течение трех часов все пленки приобрели диэлектрические свойства.

## Электронное строение и динамика решетки $\text{Ve}_2\text{NCl}$

Тимофеев Вячеслав Сергеевич

Кемеровский государственный университет

Гордиенко Алексей Болеславович, д.ф.-м.н.

[slava.timofeev.mail@gmail.com](mailto:slava.timofeev.mail@gmail.com)

Целью работы является исследование из первых принципов структурных параметров, электронной структуры, диэлектрических свойств, химической связи и динамики решетки гипотетического кристалла  $\text{Ve}_2\text{NCl}$  со структурой анти-халькопирита, которая отличается от классической структуры обратным порядком следования катионов и анионов.

Вычисления выполнялись с использованием пакета программ Quantum ESPRESSO [1] в локальном приближении теории функционала плотности. Для исследования была сформирована следующая схема псевдопотенциалов (ПП): Ve - сохраняющий норму ПП PZ (Perdew-Zunger) [2], N - сохраняющий норму ПП PZ, Cl - ультрамягкий ПП PZ. Энергии обрезания для плоских волн и представления электронной плотности составляли 100 и 1000 Ry соответственно,  $\mathbf{k}$ -сетка  $4 \times 4 \times 4$ . Оптимизация структуры проводилась квазиньютоновским методом по алгоритму Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно (BFGS) [3]. Ниже кратко представлены результаты для кристалла  $\text{Ve}_2\text{NCl}$ .

Итоговые параметры решетки:  $a = 8.44$  Бор ( $4.47\text{ \AA}$ ) и  $c = 15.84$  Бор ( $8.38\text{ \AA}$ ). Тетрагональное сжатие  $c/a = 1.88$ . Равновесные длины неэквивалентных связей Ve-Cl и Ve-N равны  $2.24\text{ \AA}$  и  $1.64\text{ \AA}$ , соответственно, что определяет параметр смещения катионов  $u = 0.37$ .

Зонная структура кристалла  $\text{Ve}_2\text{NCl}$  представлена на рис.1(а). Как видно, рассматриваемый кристалл представляет собой диэлектрик с шириной запрещенной зоны  $E_g = 3.33$  эВ. Максимум валентной зоны реализуется в центре зоны Бриллюэна (точка Г) и совпадает с конкурирующим минимумом зоны проводимости, следовательно, кристалл прямозонный. Структура валентной зоны схожа с, характерной для родственных кристаллов, решеткой халькопирита. Валентная зона разделена на три разрешенные полосы. Анализ проектированных плотностей состояний показал, что нижняя полоса валентной зоны принадлежит состояниям s-электронов атомов Cl, средняя полоса валентной зоны принадлежит состояниям s-электронов атомов N и верхняя полоса валентной зоны имеет смешанный характер, она состоит из p-состояний электронов Cl и N. Состояния электронов атомов Ve располагаются преимущественно в зоне проводимости.

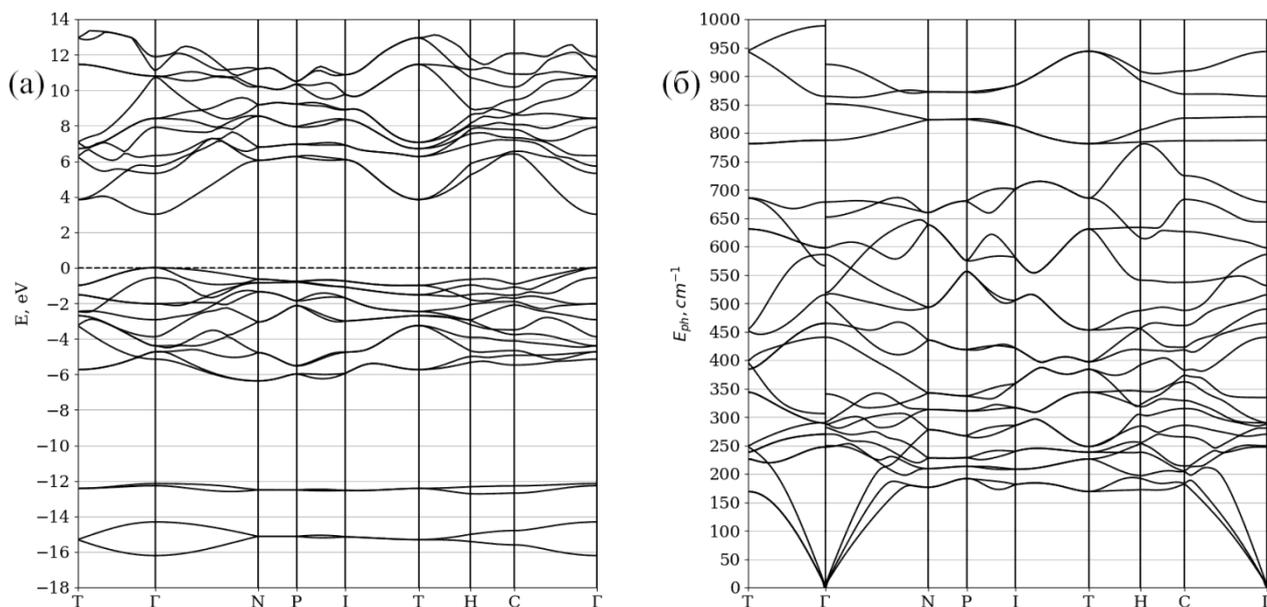


рис.1. Зонная структура (а) и фоновый спектр (б) кристалла  $Be_2NCl$ .

Характер распределения заряда, форма функции электронной локализации (ELF), значения эффективных зарядов Борна и высокочастотная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_{xy}=4.63$ ,  $\epsilon_z=4.19$ ) указывают на ионный тип химической связи.

Фоновый спектр представлен на рис.1(б). Полная ширина порядка  $1000\text{ см}^{-1}$ . Отсутствие мнимых частот подтверждает устойчивость гипотетического кристалла  $Be_2NCl$  со структурой анти-халькопирит. Также были рассчитаны вклады атомов в фоновые колебания в точке  $\Gamma$ . Вычислены полная и парциальные плотности фоновых состояний.

Список публикаций:

- [1] *GENERAL DOCUMENTATION for Quantum ESPRESSO* Режим доступа: <https://www.quantum-espresso.org/resources/users-manual> (Дата обращения: 21.02.2022)  
 [2] Perdew J. P., Zunger A. Self-interaction correction to density-functional approximations for many-electron systems // *Phys. Rev. B.* — 1981. — May. — Vol. 23, 10. — P. 5048–5079.  
 [3] Nocedal, Jorge; Wright, Stephen J. *Numerical Optimization.* - 2nd edition. — USA: Springer, 2006. — ISBN 978-0-387-30303-1.

## Разработка метода решения задачи перекрывающихся диапазонов в EXELFS спектроскопии

**Хаметова Элина Фанилевна**

**Бакиева Ольга Ринатовна**

**Удмуртский государственный университет**

**Бакиева Ольга Ринатовна, к.ф.-м.н.**

**[elinaphanilevna851@gmail.com](mailto:elinaphanilevna851@gmail.com)**

В настоящее время самые актуальные разработки и инновации сконцентрированы вокруг материалов с низкой размерностью – это и сложная наноструктурированная керамика, и нанокompозитные материалы для фотоники, и топологические сверхпроводники для нового поколения квантовых компьютеров. Классическим методом исследования локальной атомной структуры вещества является спектроскопия EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure), которая реализована на станциях синхротронного излучения [1-3]. Для исследования легких элементов и сильно локализованных особенностей вместо рентгеновского возбуждения удобно использовать моноэнергетичный электронный пучок – спектроскопия EXELFS (Extended Electron Energy Loss Fine Structure). В результате электронного удара в спектре наблюдаются края характеристических потерь, за которыми расположены осцилляции периодом 15-20 эВ и протяженностью несколько сотен эВ, которая обусловлены когерентным рассеянием вторичного электрона на локальном окружении возбуждаемого атома [4-6]. Фурье-анализ таких спектров дает информацию о том, на каком расстоянии расположены атомы, какого сорта и в каком количестве. Однако, при исследовании многокомпонентных систем, до сих пор существует

проблема анализа спектров, в которых происходит наложение сигналов нескольких химических элементов в одном диапазоне энергий.

Например, в EXELFS спектре диоксида титана (рис. 1) присутствуют  $L_{2,3}$  край возбуждения титана ( $E_{loss} = 461$  эВ), за которым расположены осцилляции, протяженность которых, по данным модельных расчетов, может достигать 400-500 эВ. Фурье-анализ этой осциллирующей структуры может дать информацию о параметрах связей Ti-Ti и Ti-O. Однако, в этом же диапазоне энергий расположен K-край возбуждения кислорода ( $E_{loss} = 532$  эВ), за которым также есть осцилляции, содержащие информацию о связях O-Ti и O-O. В результате экспериментальный спектр предстает собой суперпозицию возбуждений атомов титана и кислорода (рис. 1). Существующие на данный момент пакеты программ (Feffit, Viper, и др.) для анализа как EXAFS, так и EXELFS спектров не предназначены для анализа таких перекрывающихся структур.

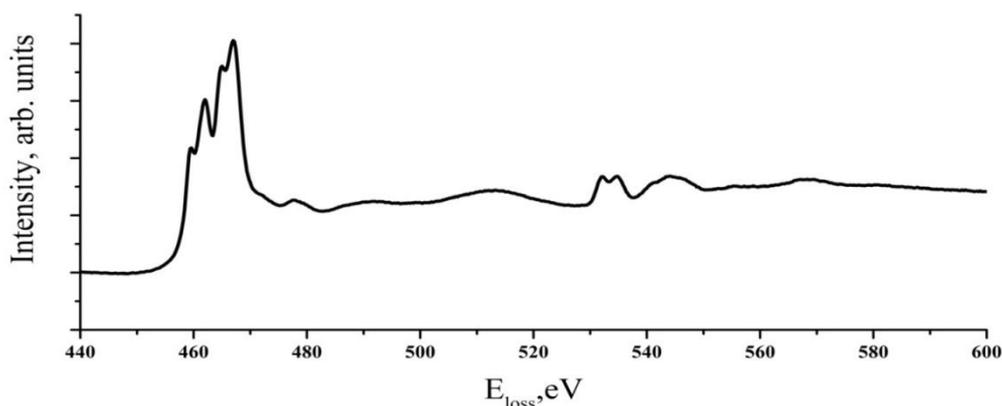


рис. 1. Спектр  $TiO_2$  [7]

Решение данной проблемы было рассмотрено ранее для спектров, полученных в геометрии отражения вторичного электрона от поверхности образца [8]. В настоящей работе предложен алгоритм позволяющий анализировать спектры перекрывающихся диапазонов EXELFS спектров, полученных в геометрии эксперимента на просвет. Такие спектры получают на просвечивающих электронных микроскопах. Апробация метода была проведена на EXELFS спектре диоксида титана  $TiO_2$  со структурой рутила (рис. 1.). Метод основан на моделировании сигналов титана и кислорода и учета их в экспериментальных данных. Полученные результаты параметров химических связей Ti-Ti, Ti-O, O-O (парциальные координационные числа, длины химической связи и параметры их дисперсии) показали хорошее соответствие с известными кристаллографическими параметрами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №121030100002-0. Исследования выполняли с использованием оборудования ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН.

#### Список публикаций:

- [1] P.A. Lee, P.H. Citrin, P. Eisenberger, B.M. Kincaid, *Extended X-ray absorption fine structure—its strengths and limitations as a structural tool* // *Rev. Mod. Phys.* 1981. V.53. pp. 769-806. doi:10.1103/RevModPhys. 53.769
- [2] B. Teo, D. Joy, *EXAFS Spectroscopy and Related Techniques* // Plenum, New York .1981
- [3] J. Rehr, R. Albers, *Theoretical approaches to X-ray absorption fine structure* // *Rev. Mod. Phys.* 3 (72) (2000), pp. 621-654. doi:10.1103/RevModPhys. 72.621
- [4] Yu.V. Ruts, D.E. Guy, D.V. Surnin, V.I. Grebennikov, *Secondary Electron Fine Structure – A Method of Local Atomic Structure Characterization*, in: H.S. Nalwa (Ed.)// *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials*, Academic Press, New-York. 2001.V. 2.
- [5] D. Guy, O. Bakieva, V. Grebennikov, D. Surnin, Y. Ruts, *Electron Energy Loss Spectroscopy for quantitative analysis of the local atomic structure of superthin oxide films on the surface of 3d-metals*// *J. El. Spectr. Rel. Phen.* 182 (2010) 115.
- [6] I.K.Averkiev, O.R.Bakieva, O.M.Nemtsova, A.A.Kolotov, F.Z.Gil'mutdinov, *Changes in the chemical compound and local atomic structure of ultrathin surface layers of Fe due to implantation of argon and oxygen ions* // *Applied Surface Science*.2021. V.539
- [7] P. Ewels, T. Sikora, V. Serin, C. P. Ewels and L. Lajaunie. *A Complete Overhaul of the Electron Energy-Loss Spectroscopy and X-Ray Absorption Spectroscopy Database: eelsdb.eu.* *Microscopy and Microanalysis*, available on CJO2016. doi:10.1017/S1431927616000179.
- [8] O.R.Bakieva, O.M.Nemtsova, *Electron energy loss spectroscopy equation for spectra with overlapping oscillations and its solution by a regularization method* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*.2016. V.368. pp.103-111.



### 3 - Физика полупроводников и диэлектриков

Исламов Дамир Ревинирович, с.н.с.

Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, лаб. 10

**Сегнетоэлектрическая память FRAM - кандидат на роль универсальной памяти**

e-mail: [damir@isp.nsc.ru](mailto:damir@isp.nsc.ru)

стр. 36

Краснова Ирина Андреевна, магистрант 2 года обучения

Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Физический

**Исследование влияния собственного окисла на поверхность CdHgTe после жидкостного травления**

Сидоров Георгий Юрьевич, Горшков Дмитрий Витальевич,

e-mail: [i.krasnova@gsu.ru](mailto:i.krasnova@gsu.ru)

стр. 37

Остальцова Анастасия Дмитриевна, 1 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, физико-технический институт

**Фототранзисторы на основе производных фуллерена**

Салихов Ренат Баязитович, д.ф.-м.н.

e-mail: [nastia.ostaltsova@yandex.ru](mailto:nastia.ostaltsova@yandex.ru)

стр. 38

## Сегнетоэлектрическая память FRAM – кандидат на роль универсальной памяти

*Исламов Дамир Ревинирович*

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*

*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет*

*damir@isp.nsc.ru*

Одной из наиболее приоритетных задач современной микроэлектроники является создание универсального запоминающего устройства, обладающего высокой скоростью записи и считывания информации, вместе с большим временем хранения, высокой информационной плотностью и энергонезависимостью. Для создания универсальной памяти необходимо эксплуатировать новые материалы и их функциональные свойства, поскольку физические принципы работы выпускаемых промышленностью устройств памяти и технологии, основанные на них, практически уже достигли предела своих возможностей. Исследования памяти на основе сегнетоэлектрического переключения FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) осуществляются на протяжении более 30 лет. Детально изучены технология и сегнетоэлектрические свойства  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$  (PZT),  $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$  (SBT),  $\text{Bi}_{3,75}\text{La}_{0,25}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  (BLT) и других сегнетоэлектрических плёнок. Проблема применения перечисленных материалов в качестве активной среды FRAM состоит в том, что их поляризация катастрофически падает при толщинах плёнок менее 100 нм. В свою очередь большая толщина сегнетоэлектрических плёнок (большое аспектное соотношение) приводит к большим размерам ячейки памяти FRAM. По этой причине информационная ёмкость современных FRAM не превышает 128 Мбайт/чип (Компания Ramtron, США). Для сравнения ёмкость современной флэш памяти составляет 256 Гбайт/чип.

Открытие сегнетоэлектрического эффекта в нанометровых слоях  $\text{HfO}_2$  вызвало взрывной интерес к изучению физических свойств этих материалов, в связи с перспективой разработки FRAM памяти терабитного масштаба, способной претендовать на роль универсальной памяти. Сегнетоэлектрические свойства тонких легированных плёнок  $\text{HfO}_2$  были обнаружены в 2007 году членами группы из NaMLab в компании Qimonda совместно с RWTH Aachen при поиске материалов с высокой диэлектрической проницаемостью для использования в конденсаторах ДОЗУ. Авторами была обнаружена ранее не наблюдавшаяся в нормальных условиях нецентросимметричная (полярная) орторомбическая фаза (o-фаза) между моноклинной (m-) и тетрагональной (t-) фазами в легированных слоях  $\text{HfO}_2$  толщиной от 5 до 50 нм [1–3]. Для более толстых плёнок доля m- фазы увеличивается по отношению к o- фазе, что приводит к снижению сегнетоэлектрических свойств. Поляризация плёнки происходит внутри элементарных ячеек o- фазы, перемещая четыре атома кислорода между двумя зеркально симметричными положениями, определяемыми двумя локальными минимумами, разделёнными энергетическим барьером. Стабилизация сегнетоэлектрической фазы в  $\text{HfO}_2$  требует легирования различными элементами, в том числе Si, Al, Y, Gd, La и другими, с последующим высокотемпературным отжигом (~1000 °C). При переборе легирующих примесей выявлено, что окно уровня легирования для формирования сегнетоэлектрической фазы увеличивается с атомным радиусом легирующей примеси. Для легирующих примесей относительно малого ионного радиуса, таких как Si и Al (радиус 110/125 пм), имеется небольшое окно уровня легирования (~2 ат.%) в отличие от более «крупных» атомов, таких как La (радиус 195 пм), для которых окно легирования >10 ат.%. До сих пор неясно, что больше влияет на формирование сегнетоэлектрической фазы легированного слоя  $\text{HfO}_2$ : ионный радиус примеси или связанная с примесью повышенная концентрация вакансий кислорода в  $\text{HfO}_2$ . Для разных концентраций вакансий кислорода была обнаружена прямая корреляция с долей фазы беспримесного  $\text{HfO}_2$  в структуре легированной плёнки [4, 5]. Несмотря на то, что небольшая концентрация вакансий кислорода стабилизирует сегнетоэлектрическую фазу в  $\text{HfO}_2$ , повышение количества дефектов приводит к разрушению этой фазы и деградации всего прибора памяти.

Особый интерес представляет тот факт, что сегнетоэлектрические свойства также были продемонстрированы в тонких плёнках твёрдого раствора  $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ , для которых высокотемпературный отжиг не требуется, что делает этот материал совместимым с современным технологическим процессом кремниевого производства.

В настоящем обзоре описаны физические принципы работы FRAM, основные проблемы, которые необходимо решить перед массовым коммерческим производством.

Список публикаций:

- [1] T. S. Böске, St. Teichert, J. Müller et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 102903.
- [2] T. S. Böске, St. Teichert, J. Müller et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 112904.
- [3] X. Sang, E. D. Grimley, T. Schenk et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. P. 162905.
- [4] A. Pal, V. Narasimhan, S. Weeks et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2017. V. 110. P. 022903.
- [5] D.R. Islamov, V.A. Gritsenko, T.V. Perevalov et al. // *Acta Materialia.* 2019. V. 166. P. 47.

## Исследование влияния собственного окисла на поверхность CdHgTe после жидкостного травления

Краснова Ирина Андреевна

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Сидоров Георгий Юрьевич, Горшков Дмитрий Витальевич

[i.krasnova@g.nsu.ru](mailto:i.krasnova@g.nsu.ru)

Твердый раствор кадмий-ртуть-теллур  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ) широко применяется в науке и технике при создании фотоприемных матриц инфракрасного диапазона спектра [1], исследовании топологических изоляторов, двумерного электронного газа. Для любых применений необходимо пассивирующее покрытие. Из литературы [2] известно, что хорошим пассивирующим покрытием для КРТ является оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ), выращенный методом плазменно-индуцированного атомно-слоевого осаждения (ПАСО) при температуре  $120^\circ C$ . Но при изготовлении фотоприемных матриц также необходимо производить травление меза-структур для уменьшения фотоэлектрической связи между фотоприемными элементами. В настоящее время для этих целей применяется раствор Вг в НВг. При таком травлении на боковых поверхностях меза-структур появляется избыточный теллур, окисел теллура, которые влияют на электрофизические свойства границы раздела КРТ- $Al_2O_3$ . Таким образом, в данной работе исследуется влияние отсутствия собственного окисла КРТ на электрофизические свойства границы раздела КРТ- $Al_2O_3$ .

Исследования проводились на пластине КРТ, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с молярным составом  $Cd\ x=0.22$ . Затем пластина отжигалась при минимальном давлении паров ртути для преобразования проводимости пленки КРТ в р-тип. Концентрация дырок и их подвижность после роста КРТ, измеренные методом эффекта Холла, были равны  $1.2 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  и  $520\text{ см}^2V^{-1}s^{-1}$ , соответственно. Затем собственный окисел и варизонный слой удалялись жидкостным травлением водным раствором Вг + НВг. После этого пластина была разделена на несколько частей, каждая из которых представляет собой единый образец. Это позволило минимизировать разброс объемных параметров образцов (плотности, подвижности носителей и концентрации дефектов) с точностью до неоднородности пленки КРТ по площади пластины. После травления на образцах проводилась дополнительная обработка. Для изучения влияния наличия собственного окисла КРТ был изготовлен образец, который в течение суток хранился на воздухе, результате чего на нем образовалось около 1 нм собственного окисла [3]. Так же был изготовлен образец, который в течение суток находился в парах перекиси водорода ( $H_2O_2$ ), согласно данным работы [3] на поверхности образовалось 2.5 нм собственного окисла. Для исследования влияния отсутствия собственного окисла был сделан образец, на котором проводилось удаление собственного окисла с помощью HCl и ИПС. Был изготовлен образец, который после травления загружался в вакуумную камеру роста  $Al_2O_3$  и на него наносился триметиалюминия (ТМА) без окисления. Взаимодействуя с кислородом в окисле КРТ, ТМА восстанавливает его с образованием оксида алюминия. Так же был сделан образец, на котором после травления не проводились дополнительные обработки. Далее на все образцы наносился  $Al_2O_3$ , методом ПАСО при температуре  $120^\circ C$ , и изготавливались МДП структуры. На этих структурах измерялся импеданс в зависимости от напряжения и частоты при температуре жидкого азота ( $77^\circ K$ ). Из полученных данных были найдены значения емкости диэлектрика, ширины гистерезисов, положения напряжения плоских зон и карты нормированной параллельной проводимости, из которых оценивались плотности поверхностных состояний.

Измерение вольт-фарадных характеристик при различном начальном напряжении показало для большинства образцов, что при увеличении начального напряжения увеличивается ширина гистерезиса, а так же вся вольт-фарадная характеристика сдвигается по оси напряжений. Это свидетельствует о зарядки медленных состояний в диэлектрике. Исключение составил образец, который сутки пролежал в парах  $H_2O_2$ . Для него даже при большом напряжении практически не наблюдается гистерезиса. Полученные данные позволили определить оптимальный диапазон дальнейших измерений для минимизации влияния зарядки медленных состояний. Получено, что на всех образцах наблюдается одинаковый разброс емкости диэлектрика, что говорит об однородности слоя  $Al_2O_3$ . Установлено, что наибольшее смещение положения плоских зон достигается для образца, который сутки окислялся в парах  $H_2O_2$ . Это свидетельствует о наибольшем значении фиксированного встроенного заряда в диэлектрик. У остальных образцов наблюдается близкое в пределах погрешности значение смещения положения плоских зон. Из полученных карт нормированной параллельной проводимости было оценено, что наибольшее значение плотности поверхностных состояний достигается в образце с собственным окислом КРТ, выращенным в парах  $H_2O_2$  и в образце, на котором проводилось удаление собственного окисла КРТ в HCl и ИПС. А для образца, на котором проводилось нанесение после травления ТМА без окисления, наблюдается наименьшее значение плотности поверхностных состояний.

Установлено, что перспективным способом обработки КРТ, после жидкостного травления, для улучшения границы раздела КРТ- $Al_2O_3$  является уменьшение собственного окисла КРТ с помощью ТМА.

Список публикаций:

[1] Рогольский А. // Инфракрасные детекторы: пер. с англ./под ред. А.В. Войцеховского. Новосибирск: Наука. 2003. С. 636.

[2] Gorshkov D. V. and etc. // Technical Physics Letters. 2020. 53, 741.

[3] Сидоров Г. Ю. и др. // Автометрия. 2017. 46, 97.

## Фототранзисторы на основе производных фуллерена

Остальцова Анастасия Дмитриевна

Баширский государственный университет

Салихов Ренат Баязитович, д.ф.-м.н.

[nastia.ostaltsova@yandex.ru](mailto:nastia.ostaltsova@yandex.ru)

На основе фотохромных гибридных молекул изготовлены светорегулируемые органические полевые транзисторы, которые продемонстрировали достаточно высокую светочувствительность и чувствительность, быструю реакцию на облучение. Были исследованы тонкие пленки образцов 3-х видов: с отдельными слоями (P), механически-перемешанные (M) и химически-связанные производные фуллерена и фотохрома (X).

Подвижности носителей заряда активного слоя  $\mu$ , изготовленных органических фототранзисторов, оценена с помощью формулы (1):

$$I_{DS} = (W/L)\mu C(U_G - U_{th}) U_{DS}, \quad (1)$$

где  $W$  — ширина канала,  $L$  — длина канала,  $C$  — емкость на квадрат площади подзатворного диэлектрика  $AlO_x$  (для толщины  $W=400\text{ нм}$   $C=8,9\text{ нФ/см}^2$ ),  $U_G$  — напряжение на затворе,  $U_{DS}$  — напряжение между стоком и истоком,  $U_{th}$  — пороговое напряжение.

Оценочные значения подвижности носителей составляют  $\mu(P)=0,003\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\mu(M)=0,012\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\mu(X)=0,043\text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ . Рассчитанное значение подвижности носителей заряда обусловлено малой концентрацией носителей заряда в полученных пленках.

Основным преимуществом таких гибридных структур является их высокая стабильность, что было подтверждено во время высокоскоростных испытаний с многократным включением (ВКЛ и ВЫКЛ), которые отражают производительность устройства. Все измерения проводились в нормальных условиях - на воздухе, что является неоспоримым преимуществом изученных транзисторных структур по сравнению с большинством экспериментальных структур на основе других соединений [1].

Исследование вольт-амперных характеристик изготовленных транзисторов показало, что в отсутствие облучения токи в фототранзисторах не превышают 1 нА или имеют такой же порядок величины. При облучении УФ-светом (350 нм) в поле зазора транзистора ток сток-исток увеличивается на три порядка для обоих устройств. Таким образом, отношение тока  $I_{on}/I_{off}$  составляет около 1000. Кинетика фотоотклика показана на рис. 1. Подавались световые импульсы разной длительности. Как видим, органические фототранзисторы реагируют по-разному.

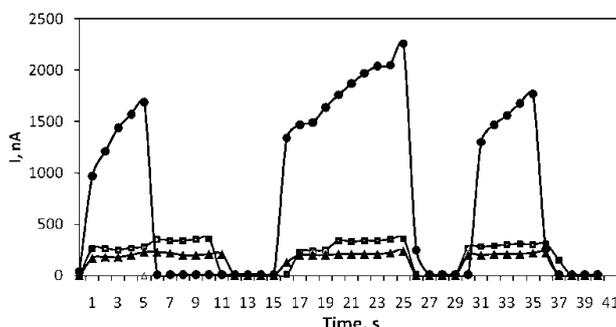


рис.1. Кинетика увеличения и уменьшения токов  $I_{DS}$  для органических фототранзисторов: пиirroлидинофуллерена X (круглые точки), отдельных слоев фуллерена  $C_{60}$  и дитиенилэтена P (треугольные точки), а также смешанных слоев  $C_{60}$  и дитиенилэтена M (квадратные точки). При включении и выключении ультрафиолета (150 Вт, 350 нм) для  $V_{DS} = 16\text{ В}$  и  $V_G = 16\text{ В}$

Мы изготовили и исследовали фотоуправляемый органический фототранзистор, содержащий фуллерены дитиенилэтена/пиirroлидинофуллерена в качестве активного слоя. Одновременно, для строгого и объективного сравнения наших результатов с литературными данными, был изготовлен многослойный транзистор, в котором полупроводник (фуллерен  $C_{60}$ ) и светууправляемое соединение (дитиенилэтена) образовывало отдельные слои[2].

Список публикаций:

[1] Tuktarov A.R., Khuzin A.A., Dzhemilev U.M., Salikhov R.B., Safargalin I.N., Mullagaliev I.N., Venidiktova O.V., Valova T.M., Barachevsky V.A. Optically controlled field effect transistors based on photochromic spiropyran and fullerene  $C_{60}$  films. //Mendeleev Communications. 2019. T. 29. № 2. С. 160.

[2] Tuktarov A.R., Khuzin A.A., Popodko N.R., Dzhemilev U.M., Salikhov R.B., Safargalin I.N., Mullagaliev I.N. Photocontrolled organic field effect transistors based on the fullerene  $C_{60}$  and spiropyran hybrid molecule. // RSC Advances. 2019. T. 9. № 13. С. 7505-7508.

## 6 - Магнетизм

Зуева Екатерина Андреевна, 3 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Отделение электроники

**Магнитоэлектрический микрополосковый СВЧ датчик**

Лобекин Вячеслав Николаевич,

e-mail: [Ekaterina.Zueva@novsu.ru](mailto:Ekaterina.Zueva@novsu.ru) стр. 41

Иванов Сергей Вадимович, 3 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

**Применение магнитоэлектрического гиратора в РЭА**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [sivanovvad@mail.ru](mailto:sivanovvad@mail.ru) стр. 42

Ивашева Елена Евгеньевна, 2 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, конструирования и технологии электронных средств

**Исследование магнитоэлектрических структур с различной магнитострикционной фазой на основе сплавов АМАГ**

Бичурин Мирза Имамович, Д.ф.-м.н.

e-mail: [ellen9879@yandex.ru](mailto:ellen9879@yandex.ru) стр. 44

Козонов Александр Юрьевич, 4 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

**Магнитоэлектрический диод на основе магнитострикционно-пьезополупроводниковой структуры**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [s241716@std.novsu.ru](mailto:s241716@std.novsu.ru) стр. 45

Кузьмин Евгений Валентинович, аспирант 2 года обучения

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт электронных и информационных систем

**Исследование магнитоэлектрического эффекта в структурах Метглас/GaAs/Метглас и Метглас/SiC/Метглас**

Петров Роман Валерьевич, д.ф.-м.н.

e-mail: [7777744444@mail.ru](mailto:7777744444@mail.ru) стр. 46

Леонтьев Виктор Сергеевич, зав. лаб.

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

**Применение магнитоэлектрического датчика в беспроводной системе измерения тока**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [viktorsergeevich.novsu@gmail.com](mailto:viktorsergeevich.novsu@gmail.com) стр. 48

Леонтьев Виктор Сергеевич, м.н.с.

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

**Датчик тока на основе самонамагничивающей структуры LiNbO<sub>3</sub>/Ni/Metglas**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [viktorsergeevich.novsu@gmail.com](mailto:viktorsergeevich.novsu@gmail.com) стр. 50

Лобекин Вячеслав Николаевич, аспирант 3 года обучения

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

**Моделирование сплит-кольцевого резонатора со структурой метаматериалов с ферритовым элементом**

Татаренко Александр Сергеевич, к.т.н.

e-mail: [slavalobekin@gmail.com](mailto:slavalobekin@gmail.com) стр. 53

Лобекин Вячеслав Николаевич, инженер-исследователь  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение  
электроники

**Магнитоэлектрический магнитокардиометр**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [slavalobekin@gmail.com](mailto:slavalobekin@gmail.com) стр. 51

Мухамадеева Виктория Владимировна, магистрант 1 года обучения  
Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Структура и динамика связанных вихрей в СТНО под воздействием спин-поляризованного тока**

Екомасов Евгений Григорьевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [mukhamadeeva.vika@mail.ru](mailto:mukhamadeeva.vika@mail.ru) стр. 54

Орехова Светлана Михайловна, 2 курс  
Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет, физико-технический

**Фрагментация падающих капель магнитной жидкости**

Закинян Артур Робертович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [lanafox189@mail.ru](mailto:lanafox189@mail.ru) стр. 56

Петров Дмитрий Александрович, 2 курс  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, аспирантура  
(отделение электроники)

**Магнитоэлектрический резистор на основе магнитострикционно - пьезополупроводниковой структуры  
Metglas/GaAs/Metglas"**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [s182335@std.novsu.ru](mailto:s182335@std.novsu.ru) стр. 57

Ромазев Павел Евгеньевич, магистрант 2 года обучения  
Челябинск, Челябинский государственный университет, физический

**Магнитоэлектрический эффект в объемных мультиферроидных композиционных материалах**

Лупицкая Юлия Александровна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [paulcoolpaul174@gmail.com](mailto:paulcoolpaul174@gmail.com) стр. 58

Семенова Ксения Витальевна, 4 курс  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Отделение  
электроники

**Магнитоэлектрический тиристор**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [semenovaksu@icloud.com](mailto:semenovaksu@icloud.com) стр. 59

Сыроварова Кристина Андреевна, 4 курс  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение  
электроники

**Магнитоэлектрический транзистор**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [crstnaa@icloud.com](mailto:crstnaa@icloud.com) стр. 60

Филиппов Михаил Александрович, магистрант 1 года обучения  
Уфа, Башкирский государственный университет, физико-технический институт

**Процессы перемагничивания магнитоодонсных плёнок с колумнарным дефектом в перпендикулярном и  
плоскостном полях**

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [mikhail.filippov.99@mail.ru](mailto:mikhail.filippov.99@mail.ru) стр. 61

## Магнитоэлектрический микрополосковый СВЧ датчик

*Зуева Екатерина Андреевна*

*Ивашева Елена Евгеньевна*

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Лобекин Вячеслав Николаевич*

*[Ekaterina.Zueva@novsu.ru](mailto:Ekaterina.Zueva@novsu.ru)*

Сочетание магнитных и электрических свойств, а также свойств, обусловленных магнитоэлектрическим (МЭ) взаимодействием в слоистой феррит-пьезоэлектрической структуре, открывает широкие возможности для создания новых СВЧ датчиков. Такие датчики на МЭ микроволновом эффекте широко используются в промышленности, медицине, окружающей среде и многих других областях.

Предлагаемый МЭ микрополосковый СВЧ датчик работает на обратном резонансном МЭ эффекте, представляющим собой сдвиг линии ферромагнитного резонанса (ФМР) во внешнем постоянном электрическом поле [1]. Резонансный обратный МЭ эффект в феррит-пьезоэлектрических композитах реализуется приложением электрического поля к пьезоэлектрической фазе, за счёт пьезоэлектрического эффекта возникает деформация, которая передается на ферритовую фазу, в результате магнестрикции происходит МЭ микроволновый эффект. На основе МЭ структур разрабатываются такие устройства как: фазовращатели, аттенюаторы, модуляторы, переключатели, фильтры, датчики мощности, а с использованием нелинейного МЭ эффекта также ограничители, умножители, генераторы [2].

Практический анализ МЭ материалов показывает, что многослойные композитные структуры на основе пьезоэлектрических и ферритовых материалов следует считать наиболее эффективными в микроволновом диапазоне поскольку в них МЭ эффект достигает максимальной величины. Монокристаллический железиттриевый гранат (ЖИГ) имеет самую узкую ширину линии ФМР, поэтому многие МЭ СВЧ устройства основаны на сочетании ЖИГ монокристалла с пьезоэлектрическим материалом. Ширина кривой у лучших образцов ЖИГ порядка 0,1-0,2 Э.

На рис.1 представлена конструкция отражательного МЭ СВЧ датчика на основе феррит-пьезоэлектрической структуры, использующей пластинки монокристаллического ЖИГ и поляризованного ЦТС с толщинами 0,25 мм. Конструкция выполнена на подложке из фольгированного материала марки ФЛАН-10. Основой конструкции МЭ датчика является микрополосковая линия передачи со шлейфами длиной  $3\lambda/8$ ,  $1/8\lambda$ , благодаря которым создается круговая поляризация магнитного поля в области резонатора. Шлейф  $1/4\lambda$  КЗ используется для согласования линии.

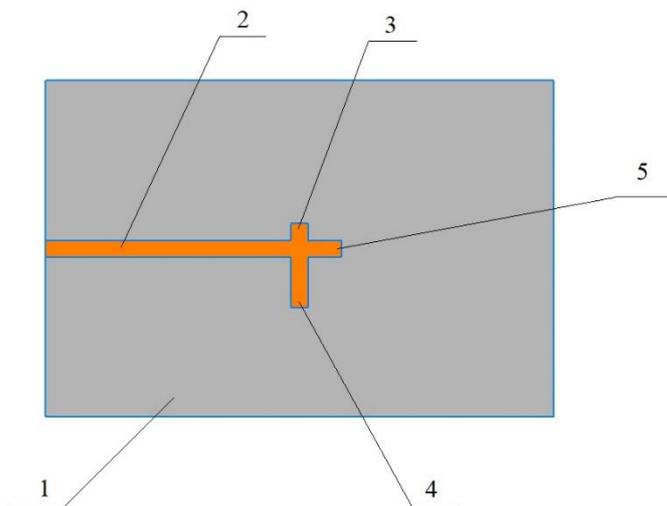


рис. 1-Конструкция МЭ СВЧ датчик: 1 - подложка ФЛАН-10; 2 - микрополосковая линия передачи; 3 - шлейф  $1/8\lambda$ ; 4 - шлейф  $3/8\lambda$ ; 5 - шлейф  $1/4\lambda$  КЗ

Принцип работы микрополоскового МЭ СВЧ датчика заключается в микроволновом МЭ эффекте. Композитная МЭ структура на основе пьезоэлектрика ЦТС и феррита ЖИГ, используемая в качестве резонатора, размещается в область круговой поляризации микроволнового магнитного поля. При подаче внешнего электрического поля МЭ СВЧ датчик реагирует на поле, вследствие чего, в пьезоэлектрической фазе резонатора происходит деформация, которая передается на ферритовую фазу, в результате происходит сдвиг резонансной линии.

Разработка данного МЭ СВЧ датчика является перспективным направлением развития СВЧ-техники, поскольку такие устройства имеют существенные преимущества и перспективы в областях биомедицины, промышленном производстве и других сферах.

Список публикаций:

- [1] Bichurin M.I. and Petrov V.M. Composite magnetolectrics: their microwave properties // *Ferroelectrics*. 1994.V. 162. P. 33-36.  
 [2] Бичурин М.И. Магнитоэлектрические материалы и их применение в технике СВЧ // *Вестник НовГУ, Сер.: Естеств. и техн. науки*, 2001, No 19, с. 7-12.

## Применение магнитоэлектрического гиратора в РЭА

*Иванов Сергей Вадимович*

*Леонтьев Виктор Сергеевич*

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Бичурин Мурза Имамович, д.ф.-м.н.*

*[sivanovvad@mail.ru](mailto:sivanovvad@mail.ru)*

Гиратор – это схема преобразования, которая может инвертировать импеданс цепи, т.е. имитировать индуктивность с помощью емкости и, наоборот, емкость с помощью индуктивности, а также преобразовывать ток в напряжение и напряжение в ток.

Гиратор в идеальном случае соответствует формулам:

$$U_1 = -R \cdot I_2, \quad (1)$$

$$U_2 = R \cdot I_1, \quad (2)$$

где  $U_1, I_1$  – напряжение и ток на входе,  $U_2, I_2$  – напряжение и ток на выходе,  $R$  – сопротивление гиратора.

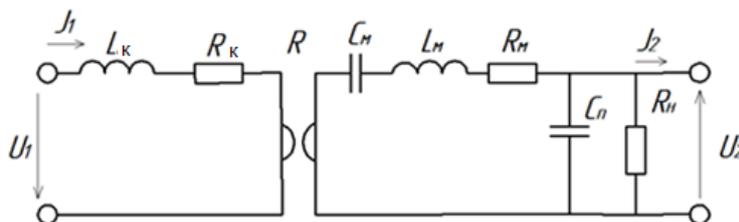


рис.1 Эквивалентная схема магнитоэлектрического гиратора

Целью исследования является возможность использования магнитоэлектрического (МЭ) гиратора в радиоэлектронной аппаратуре.

МЭ гиратор может быть реализован на основе катушки индуктивности для создания переменного магнитного поля и слоистой МЭ структуры из пьезоэлектрических и магнитострикционных фаз.

МЭ материал обладает прямым и обратным МЭ эффектом, благодаря которому выполняются функции гиратора - происходит преобразование переменного магнитного поля  $H_A$  на входе в  $U_2$  на выходе, что соответствует прямому МЭ эффекту – через деформацию магнитострикционной компоненты появляется поляризация пьезоэлектрической компоненты материала. Для описания МЭ эффекта используют МЭ коэффициент по напряжению

$$a_E = \frac{E_2}{H_A} = \frac{U_2}{H_A \cdot t}, \quad (3)$$

определяющий отношение индуцированного электрического поля в пьезоэлектрической компоненте к магнитному полю, прикладываемому к магнитной компоненте.  $a_E$  можно считать сопротивлением гиратора, которое зависит от множества факторов: частоты колебаний МЭ материала, механической связи между фазами материала, объёмного соотношения между фазами материала и т. д.

В связи со стремлением уменьшить габаритные размеры и повысить КПД современных РЭС МЭ гиратор может быть использован в качестве замены маломощных импульсных трансформаторов.

Результаты исследования недавно разработанных МЭ гираторов позволяют выделить несколько главных моментов относительно их проектирования:

МЭ гиратор, материал которого состоит из ЦТС и Метгласа, имеет высокий КПД преобразования магнитного поля в электрическое поле  $\eta_g = 93,2\%$  при низкой прикладываемой к МЭ материалу мощности ( $P_{вх} = 1$  Вт).

МЭ коэффициент по напряжению должен иметь большое значение для хорошего преобразования мощности, прикладываемой к МЭ гиратору.

Для линеаризации МЭ-свойств материалов без постоянного подмагничивающего поля  $H_b$ , требуется использовать дополнительный магнитоотрицательный материал, который создаст внутреннее магнитное поле в МЭ структуре.

Отношение длины к ширине  $L/W$  МЭ структуры должно быть наибольшим для увеличения плотности магнитного потока, а также ориентация магнитных полей должна быть в плоскости МЭ структуры для уменьшения размагничивающих факторов.

Достоинства МЭ гиратора: небольшие размеры по сравнению с обычными трансформаторами, высокий КПД при низкой входной удельной мощности. Недостатки МЭ гиратора: работа при наличии постоянного внешнего магнитного поля, эффективное преобразование  $I_{вх}/V_{вх}$  и  $V_{вх}/I_{вх}$  только на резонансной частоте материала.

С учетом особенностей проектирования МЭ гиратора была разработана МЭ структура, состоящая из слоя ЦТС размерами  $12 \times 1 \times 0,5$  мм<sup>3</sup> и двух слоев Метгласа с никелевым напылением снизу и сверху образца с размерами  $12 \times 1 \times 0,03$  мм<sup>3</sup> (толщина Метгласа 25 мкм, толщина Ni 5 мкм для каждого слоя),  $\frac{L}{W} = 12$ . МЭ образец был помещен в катушку индуктивности с 65 витками медной проволоки с радиусом сечения 0,4 мм, катушка была намотана на пластиковый полый каркас с радиусом поперечного сечения 1,7 см.

Проведены измерения электрического напряжения, возникающего в образце при МЭ эффекте в области электромеханического резонанса, и вычислены значения  $a_E$  по формуле (3). Результаты приведены в таблице:

Амплитуда напряжения в МЭ материале при резонансе $U_2$ , мВ	Частота электромеханического резонанса МЭ образца $f_{рез}$ , кГц	Напряженность внешнего магнитного поля от постоянного магнита $H_b$ , Э	Амплитуда переменного магнитного поля от катушек $H_A$ , А/м	Величина МЭ коэффициента по напряжению на частоте резонанса $a_E$ , В/А
20	79	0	0,4	100
19	80	2,6		140
28	80	5		95
25	80	0	1,8	28
20	80	2,6		59
53	76	5		22
37	83	0	5,5	13
25	78	2,6		23
63	83	5		9

По итогам работы можно сделать следующий вывод: разработанный МЭ гиратор обладает недостаточно высоким значением  $a_E$ , но демонстрирует возникновение МЭ эффекта в отсутствие внешнего магнитного поля  $H_b$  от постоянного магнита. Авторы планируют продолжить исследования с целью реализации МЭ гиратора с улучшенными параметрами.

Список публикаций:

- [1] М.И. Бичурин, В.М. Петров, Д.А. Филиппов, Г. Сринивасан *Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах*; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2005. – 231 с.
- [2] Xin Zhuang, Christophe Dolabdjian, Chung Ming Leung *и др.*; *Dimension effects of a magnetoelectric gyrotor with FeCoSiB/Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> layered composites core for efficient power conversion*. - *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019.
- [3] Chung Ming Leung, G. Sreenivasulu, Xin Zhuang *и др.* *A Highly Efficient Self-Biased Nickel-Zinc Ferrite/Metglas/PZT Magnetoelectric Gyrotor*. - *Phys. Status Solidi RRL*, 2018

## Исследование магнитоэлектрических структур с различной магнитострикционной фазой на основе аморфных сплавов АМАГ

Ивашева Елена Евгеньевна

Зуева Екатерина Андреевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

[ellen9879@yandex.ru](mailto:ellen9879@yandex.ru)

В последнее время активно изучается магнитоэлектрический эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах. Наиболее популярными магнитострикционными материалами являются никель, сплавы ферриты никеля и кобальта, галфенол, терфенол-D, Метглас. На сегодняшний день магнитомягкие аморфные сплавы типа Метглас уже используются для создания высокочувствительных датчиков, например, в биомедицине. Однако широкие исследования при выборе данных материалов для практического применения не проводились. Поэтому проведение подробных теоретических и экспериментальных исследований аморфных сплавов различных марок является актуальной задачей.

В настоящем исследовании были использованы магнитомягкие аморфные сплавы АМАГ, изготавливаемые на ПАО «Мстатор» (г. Боровичи). Исследуемые композитные структуры были изготовлены с использованием лент следующих марок: АМАГ180, АМАГ170, АМАГ200, АМАГ203, АМАГ225 (нанокристаллическая лента), АМАГ321, АМАГ324, АМАГ493, АМАГ187 и две немаркированные ленты того же производителя (в таблице и на *рис. 1*), обозначенные как АМАГХ и АМАГZ).

Экспериментальное исследование магнитомягких аморфных сплавов проводилось на магнитоэлектрических композитах. Исследуемые образцы были выполнены на основе пьезокерамики ЦТС. На пластину ЦТС размерами  $30 \times 10 \times 0,5$  мм были нанесены с каждой стороны по 3 пластины Метгласа, внешние пластины которого были на 5 мм длиннее, для пайки выводов. Соединение слоев производилось с помощью клея БФ-2. Для создания минимальной и равномерной толщины клеевых прослоек исследуемые образцы помещались под пресс с нагревом до температуры  $100^\circ\text{C}$  в течение 60 мин.

Измерения образцов производились в области электромеханического резонанса в режиме продольной моды на измерительном стенде, состоящем из генератора переменных сигналов Agilent 33500B, осциллографа Nateg НМО722, источника питания Актаком APS-3203, постоянного магнита, катушки индуктивности и магнитометра Dexing Magnet DX-180. Стенд работает следующим образом: на катушку индуктивности подается переменный сигнал с генератора, который создает переменное магнитное поле. С помощью постоянного магнита создается оптимальное постоянное магнитное поле. В результате воздействия переменного и постоянного магнитных полей, вследствие поперечного магнитоэлектрического эффекта, на обкладках образца индуцируется электрический сигнал, который фиксируется осциллографом.

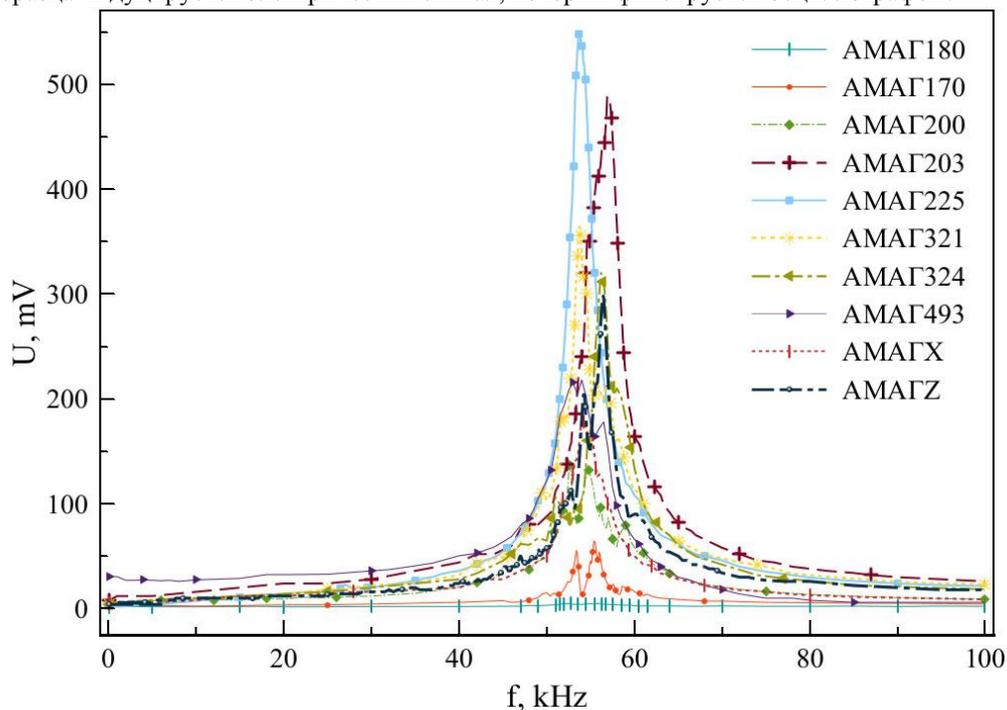


рис. 1. Зависимость выходного напряжения от частоты

На (рис.1) представлена зависимость выходного напряжения от частоты для образцов с разными марками лент АМАГ.

Марка ленты	АМАГ 170	АМАГ 180	АМАГ 187	АМАГ 200	АМАГ 203	АМАГ 225	АМАГ 321	АМАГ 324	АМАГ 493	АМАГ X	АМАГ Z
Основа	Со	Со	-	Нано	-	Fe-Ni	Fe, Fe-Co	Fe, Fe-Co	Fe, Fe-Co	-	-
Максимальное выходное напряжение $U_{\max}$ , мВ	4,8	64,4	-	136,8	488	548	364	320	218	180	298
Резонансная частота $f_r$ , кГц	52,7	55,4	-	52,6	57	53,7	53,7	56,2	54	54	56,45
Напряженность магнитного поля $H$ , Э	4	5	-	8,5	15	4,8	7	11	13,3	9	12,8

В таблице представлены данные, полученные в результате исследования образцов с различными марками лент АМАГ. Наибольшие максимальные выходные напряжения были получены с использованием лент марок АМАГ225 ( $U_{\max} = 548$  мВ на частоте  $f_r = 53,7$  кГц), АМАГ203 ( $U_{\max} = 488$  мВ на частоте  $f_r = 57$  кГц) и АМАГ321 ( $U_{\max} = 364$  мВ на частоте  $f_r = 53,7$  кГц), что следует связать, на наш взгляд, с возросшим пьезомагнитным коэффициентом. На образце с лентой марки АМАГ187 не были зафиксированы изменения выходного напряжения.

В результате проведенного экспериментального исследования были выявлены марки лент АМАГ с наибольшими показателями максимального выходного напряжения. Планируется продолжение исследований с целью выяснения механизма наблюдаемого эффекта.

Список публикаций:

- [1] Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и Метгласа // *Современные проблемы науки и образования* – 2012. - №1  
 [2] Петров В.М., Бичурин М.И. Магнитоэлектрический эффект в симметричных и асимметричных магнитострикционно-пьезоэлектрических слоистых структурах // *Современные проблемы науки и образования* – 2013. - №4

## Магнитоэлектрический диод на основе магнитострикционно-пьезополупроводниковой структуры

**Козонов Александр Юрьевич**

**Петров Дмитрий Александрович**

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.*

[s241716@std.novsu.ru](mailto:s241716@std.novsu.ru)

В настоящее время существует множество разновидностей диодов. Классифицируются данные устройства по своему функциональному назначению, размеру и характеру электрического перехода, мощности рассеивания, частотному диапазону и материалу диода. Среди всех видов данных приборов в данном исследовании выделяются те, чья вольтамперная характеристика изменяется под действием магнитного поля, т. е. магнитодиоды [1]. Несмотря на то, что подобные устройства успешно и активно изготавливаются и используются на практике, они не обладают слишком высокой магнитной чувствительностью. Устройствами с более высокой магнитной чувствительностью являются предлагаемые магнитоэлектрические диоды, работающие на магнитоэлектрическом (МЭ) эффекте. Основным преимуществом МЭ диодов является сравнительно малая величина подмагничивающего поля порядка 10 - 100 Э, в отличие от магнитных диодов, где эта величина составляет порядка 1000 Э.

Структура МЭ диода основана на идее “pin-диода”, в качестве высокоомной i-области предлагается использовать композиционную магнитострикционно-пьезополупроводниковую структуру (рис. 1). В качестве пьезополупроводниковой пластины предполагается использовать арсенид галлия GaAs, в качестве магнитострикционной – Метглас, пермендюр или никель.

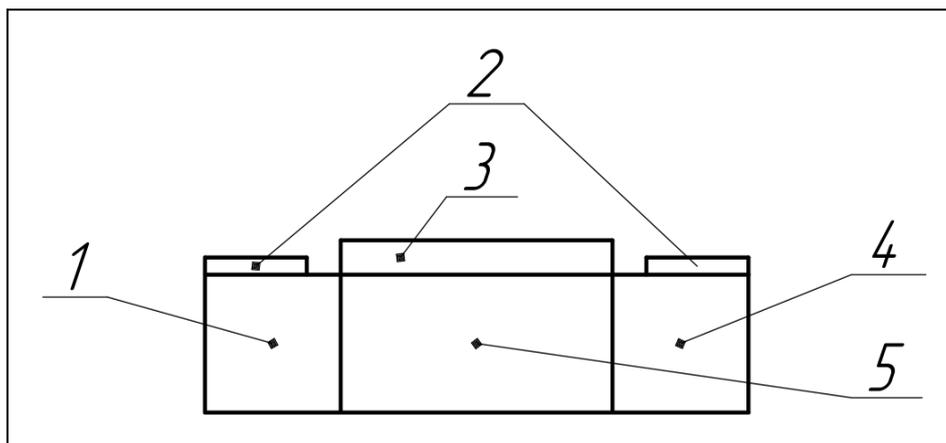


рис.1.: структура магнитоэлектрического диода: 1 – p-область, 2 – омические контакты, 3 – магнитострикционный слой, 4 – n-область, 5 – высокоомная область подложки из GaAs

Принцип работы МЭ диода заключается в следующем: возникающие под действием магнитного поля механические деформации в магнитострикционном слое передаются пьезополупроводниковому слою, что приводит к модуляции сопротивления базы диода и изменению вольтамперной характеристики.

Величина МЭ эффекта, заключающегося в возникновении электрической поляризации во внешнем магнитном поле и в намагничивании во внешнем электрическом поле, резко возрастает в области электромеханического резонанса [2]. Соответственно, чем больше величина данного эффекта, тем большую магнитную чувствительность прибора мы получим.

Одной из задач разработки новых устройств является создание многофункциональных устройств, работающих в широком частотном диапазоне. Поэтому стоит учитывать, что особенностью электромеханического резонанса является его довольно высокая частота; для её снижения в случае необходимости целесообразно в качестве высокоомной области использовать вышеупомянутый композит с градиентом намагниченности, работающий в области изгибных колебаний электромеханического резонанса [3].

Магнитоэлектрические диоды могут использоваться в разработке датчиков тока, магнитного и электромагнитного полей, преобразователей, устройств систем безопасности, навигации, медицинского оборудования и т. д.

Список публикаций:

- [1] Бараночников М. Л. // Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 544 с.: ил.  
 [2] Бичурин М. И., Петров В. М., Филиппов Д. А., Сринивасан Г. // Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2005. – 226 с.  
 [3] Магнитоэлектрический диод с внутренним магнитным полем: Патент РФ №2744931: МПК H01L, 43/08, 43/10 / Иванов С. Н., Бичурин М. И., Семенов Г. А.; ФГБОУ ВО НовГУ. - №2020120029; заявл. 09.06.2020; опубл. 17.03.2021

## Исследование магнитоэлектрического эффекта в структурах Метглас/GaAs/Метглас и Метглас/SiC/Метглас

**Кузьмин Евгений Валентинович**

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Петров Роман Валерьевич, д.ф.-м.н.

[77774444@mail.ru](mailto:77774444@mail.ru)

В последние годы интенсивно изучается магнитоэлектрический (МЭ) эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах для создания различного рода высокочувствительных сенсоров нового поколения. В материалах такого рода МЭ эффект проявляется как результат взаимодействия магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз компонентов, т.е. электрическая поляризация индуцируется внешним переменным магнитным полем в присутствии подмагничивающего поля – прямой МЭ эффект. Значение МЭ эффекта характеризуется МЭ коэффициентом по напряжению  $\alpha$ . Практически, для расчета МЭ коэффициентов приходится решать множество сложных аналитических уравнений.

В большинстве монокристаллических магнитоэлектриков ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и др.) МЭ эффект незначителен и его величина не превышает  $20 \text{ мВ}/(\text{см}\cdot\text{Э})$ , и наблюдается, как правило, при низких температурах или в больших магнитных полях, что ограничивает их практическое применение. Значительно больший по величине МЭ эффект обнаружен в композитных структурах, содержащих магнитострикционную и пьезоэлектрическую фазы. Таким образом, использование композитных структур открывает широкие возможности для практического применения МЭ материалов [1].

В настоящее время, как за рубежом, так и в России большое внимание уделяется исследованию физических свойств материалов, характеризующихся несколькими типами упорядочения (сегнетоэлектрическим, ферромагнитным, упругим и т.п.), т.е. мультиферроиков [1-3]. Это обусловлено возможностью использования мультиферроиков для создания многофункциональных электронных устройств. Взаимодействие между различными параметрами упорядочений в мультиферроиках может приводить к новым эффектам, например к магнитоэлектрическому (МЭ) эффекту. Композиционные МЭ мультиферроики, содержащие пьезоэлектрическую и магнитострикционную фазу, обладают гигантским МЭ эффектом при комнатной температуре по сравнению с однофазными МЭ материалами, что делает их перспективными для технических применений. В материалах такого рода МЭ эффект проявляется как результат взаимодействия магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз компонентов. Электрическая поляризация индуцируется внешним переменным магнитным полем в присутствии подмагничивающего поля, или индуцированная намагниченность появляется при приложении электрического поля. Количественно МЭ эффект характеризуется МЭ коэффициентом по напряжению  $\alpha_E$ , равным отношению индуцированного переменного электрического поля к приложенному магнитному переменному полю в условиях разомкнутой электрической цепи. Величина коэффициента определяется геометрией, магнитными, диэлектрическими и механическими параметрами составляющих её компонентов и частотой магнитного поля [3-5].

Измерения проводились на измерительном стенде, включающем в себя генератор сигналов Nameg НМF2550, постоянный магнит, катушку индуктивности, осциллограф Nameg НМО722 и магнитометр. Стенд работает следующим образом: на катушку индуктивности подается сигнал генератора, который создает переменное магнитное поле  $H_{\sim}$ , величиной в 1 Э. Далее, постоянным магнитом создается оптимальное постоянное магнитное поле, которое составляет 30 Э (поле смещения). В результате поперечного магнитоэлектрического эффекта создается переменный электрический сигнал, который фиксируется осциллографом.

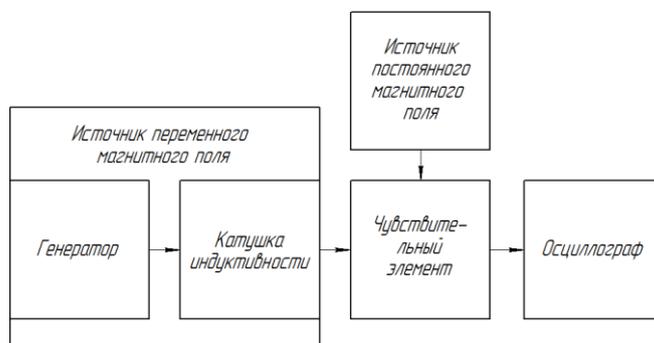


рис. 1. Структурная схема измерительного стенда

В данной работе исследовались слоистые структуры, состоящие из полупроводниковых пьезоэлектрических материалов GaAs [001] (толщиной 0,5 мм) и гексагональный политип 4H-SiC [0001] (толщиной 0,35 мм) с размерами 25x5 мм и обкладок Метгласа переменной толщины, которые одновременно служат электродами. Пластины Метгласа соединялись с полупроводниковыми материалами GaAs и SiC посредством клея, толщина клеевого слоя не превышает 1 мкм. С каждой стороны образца приклеены по 3 пластины Метгласа, внешняя пластина на 5 мм длиннее, для пайки выводов. Конструкции Метглас/GaAs/Метглас и Метглас/SiC/Метглас исследуемых МЭ элементов приведены на (рис. 2).

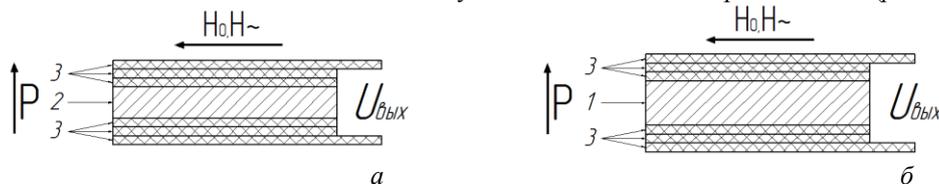


рис. 2. Конструкции Метглас/SiC/Метглас элементов: а – SiC структура; б – Метглас/GaAs/Метглас структура

Полученные результаты измерений представлены на (рис.3).

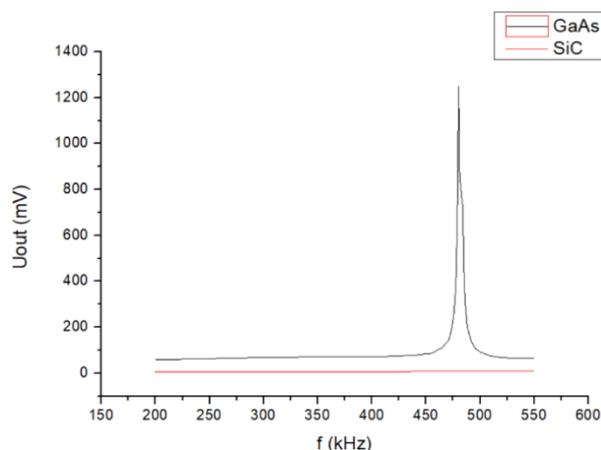


рис. 3. График зависимости выходного напряжения от частоты в исследуемых структурах

Из выше представленного графика видно, что резонансная частота составила 480,2 кГц для структуры Метглас/GaAs/Метглас, величина МЭ коэффициента по напряжению составила 2,5 В/(см·Э).

В результате проведенных экспериментальных исследований на измерительном стенде (рис. 1) МЭ эффект наблюдался только в структуре Метглас/GaAs/Метглас. Исследованы структуры Метглас/GaAs/Метглас в области электромеханического резонанса и структуры Метглас/SiC/Метглас.

Список публикаций:

- [1] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. Modeling of magnetoelectric effect in ferromagnetic/piezoelectric multilayer composites // *Ferroelectrics*, vol. 280, pp. 165–175, 2002.
- [2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-ferroelectric layered composites // *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 12, pp. 7681–7683, 2002.
- [3] *Magnetoelectricity in Composites* // Eds. M. Bichurin and D. Viehland / Pan Stanford Publishing, Singapore 2011. – 286 p.
- [4] Бичурин М.И., Петров В.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и Метгласа // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 1.
- [5] Петров В.М., Бичурин М.И. Магнитоэлектрический эффект в симметричных и асимметричных магнитоэлектрических слоистых структурах // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 4.

## Применение магнитоэлектрического датчика в беспроводной системе измерения тока

**Леонтьев Виктор Сергеевич**

Саплев Алексей Фёдорович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Иمامович, д.ф.-м.н.

[viktorsergeevich.novsu@gmail.com](mailto:viktorsergeevich.novsu@gmail.com)

Датчики тока являются очень важным типом электронных устройств. Существует большое количество датчиков тока, работающих на основе различных физических явлений. Наиболее распространенными являются магниторезистивные и датчики Холла [1]. Несмотря на то, что магнитоэлектрические (МЭ) датчики тока имеют небольшие размер и вес, а также высокую чувствительность, в публикациях им уделяется мало внимания по сравнению с МЭ датчиками магнитного поля [2]. Также на сегодняшний день отсутствуют МЭ датчики тока, готовые к практическому использованию. В данном исследовании авторами предлагается разработка и новое применение МЭ датчика тока в системах измерения постоянного и переменного тока в диапазоне 10 – 10 000 А.

Для улучшения выходных характеристик МЭ датчика тока замкнутого типа планируется использовать в качестве чувствительного элемента композит на основе бидоменной структуры Metglas / LiNbO<sub>3</sub> / Metglas. Известно, что использование бидоменных структур в магнитоэлектрических композитах повышает чувствительность системы. Ранее был рассмотрен датчик тока на основе магнитоэлектрического композита Metglas-PZT-Metglas [3] с использованием внешнего магнитного поля 15 Э. Диапазон ранее экспериментально исследованных датчиков тока составлял от 10 А до 100 А. В случае использования в качестве чувствительного элемента системы измерения тока композита на основе бидоменной структуры Metglas / LiNbO<sub>3</sub> / Metglas со следующими толщинами слоев, например, ниобат лития - 0,5 мм, Metglas - 29 мкм можно добиться снижения шумов конструкции и как следствие увеличения чувствительности системы. Дополнительным преимуществом систем измерения тока на основе ниобата лития является

отсутствие свинцового компонента в чувствительном элементе. Предварительные оценки показывают, что МЭ коэффициент в предлагаемой структуре достигает величины  $500 \text{ В / см} \cdot \text{Э}$ . Ранее проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что бидоменные структуры на основе  $\text{LiNbO}_3$ , Metglas и Ni могут быть использованы в качестве элемента для создания высокочувствительных датчиков тока без внешних подмагничивающих полей [4].

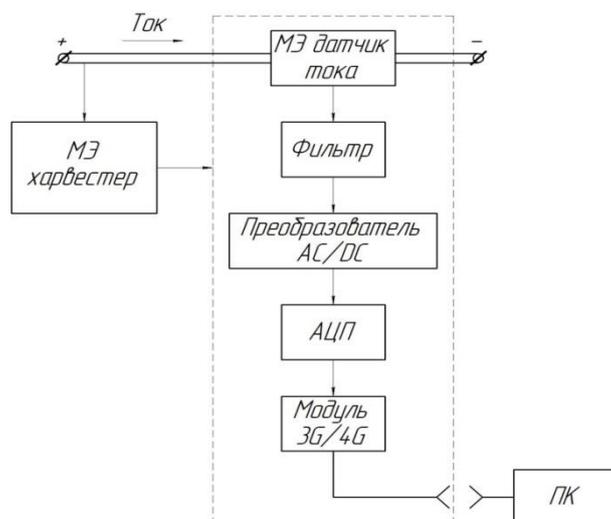


рис.1. Структурная схема беспроводной системы измерения тока на основе магнитоэлектрического датчика.

Принцип работы такой системы заключается в следующем: собранная информация МЭ датчиком передается на терминал (ПК) через удаленную сеть. Вначале измеряемый сигнал с датчика поступает на фильтр и преобразователь, после чего аналоговый сигнал посредством АЦП преобразуется в цифровой и поступает на облачный сервер посредством модуля 3G/4G. Полученные данные можно анализировать как в реальном времени, так и в заданном промежутке времени. На рис.1 также показано устройство сбора энергии - МЭ харвестер, который преобразует энергию магнитного поля измеряемого проводника с током в электрическую энергию [5]. За счет использования данного МЭ харвестера происходит питание всех измерительных модулей системы.

Использование бидоменной структуры позволит значительно снизить уровень магнитного шума, повысить чувствительность, а также уменьшить габаритные размеры устройства, поскольку нет необходимости использовать постоянный магнит и усилитель.

Предлагаемая система может измерять токи диапазоне  $10 - 10\,000 \text{ А}$  и использоваться в измерительной технике; в электрических сетях, системах управления и системах безопасности; в металлоискателях; в автомобильной промышленности; на железнодорожном транспорте; в беспроводных системах учета; в космической технике и робототехнике; в биомедицине.

Преимуществами датчика тока на основе бидоменной структуры на основе  $\text{LiNbO}_3$  являются высокая чувствительность, низкое энергопотребление, высокая точность и большой диапазон измеряемых токов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00391.

#### Список публикаций:

- [1] Mirza Bichurin, Roman Petrov, Viktor Leontiev, Oleg Sokolov, Andrei Turutin, Victor Kuts, Ilya Kubasov, Alexander Kislyuk, Alexander Temirov, Mikhail Malinkovich, Yuriy Parkhomenko Self-biased bidomain  $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas}$  magnetoelectric current sensor // *Sensors* 2020, 20, 7142; doi:10.3390/s20247142
- [2] Bichurin, M.; Petrov, R.; Sokolov, O.; Leontiev, V.; Kuts, V.; Kiselev, D.; Wang, Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review. *Sensors* 2021, 21, 6232. <https://doi.org/10.3390/s21186232>.
- [3] Bichurin, M.; Petrov, R.; Leontiev, V.; Semenov, G.; Sokolov, O. Magnetoelectric Current Sensors. *Sensors* 2017, 17, 1271. <https://doi.org/10.3390/s17061271>.
- [4] Bichurin, M.I., Sokolov, O.V., Leontiev, V.S., Petrov, R.V., Tatarenko, A.S., Semenov, G.A., Ivanov, S.N., Turutin, A.V., Kubasov, I.V., Kislyuk, A.M., Malinkovich, M.D., Parkhomenko, Y.N., Kholkin, A.L. and Sobolev, N.A. (2020), Magnetoelectric Effect in the Bidomain Lithium Niobate/Nickel/Metglas Gradient Structure. *Phys. Status Solidi B*, 257: 1900398. <https://doi.org/10.1002/pssb.201900398>
- [5] Song, M. E., Yan, Y., Gollapudi, S., Bichurin, M., Petrov, V., Sanghadasa, M., & Priya, S. (2017). Design of Metglas/polyvinylidene fluoride magnetoelectric laminates for energy harvesting from power cords. In *IEEE Sensors, SENSORS 2016 - Proceedings [7808818] (Proceedings of IEEE Sensors)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808818>

## Датчик тока на основе самонамагничивающейся структуры $\text{LiNbO}_3/\text{Ni}/\text{Metglas}$

Леонтьев Виктор Сергеевич

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

[Viktorsergeevich.novsu@gmail.com](mailto:Viktorsergeevich.novsu@gmail.com)

Датчики тока являются очень важным типом устройств. Существует большое количество датчиков тока, работающих на основе различных физических явлений. Наиболее распространенными являются такие датчики, как трансформатор тока, магниторезистивные и датчики Холла [1]. Несмотря на то, что магнитоэлектрические (МЭ) датчики тока имеют небольшие размер и вес, а также высокую чувствительность, в публикациях уделялось мало внимания их сравнению с МЭ датчиками магнитного поля [2]. Также на сегодняшний день отсутствуют МЭ датчики тока, готовые к практическому использованию.

Для улучшения выходных характеристик МЭ датчика тока, предлагается использовать в качестве чувствительного элемента композит на основе градиентной бидоменной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ . Известно [1], что использование градиентных структур в магнитоэлектрично-пьезоэлектрических композитах делает возможным использование градиента намагниченности для создания самонамагничивающейся структуры путем замены внешнего магнитного поля на внутреннее, что может значительно уменьшить вес и габариты устройства. Ранее был рассмотрен датчик тока на основе магнитоэлектрично-пьезоэлектрического композита Metglas-PZT-Metglas [2] с использованием внешнего магнитного поля 15 Э. В случае использования в качестве чувствительного элемента датчика тока на основе градиентной бидоменной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  со следующими расчетными толщинами слоев: ниобат лития - 0,5 мм, никель - 300 нм, Metglas - 29 мкм, отпадает необходимость во внешнем магнитном поле, и в результате снижения шума конструкции увеличивается чувствительность устройства. Дополнительным преимуществом датчиков тока на основе ниобата лития является отсутствие свинцового компонента в устройстве. Предварительные оценки показывают, что МЭ коэффициент в предлагаемой структуре равен  $500 \text{ В}/(\text{см}\cdot\text{Э})$ , эквивалентный уровень магнитного шума  $120 \text{ пТ}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$  при 10 Гц и чувствительности  $300 \text{ нВ}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$  при 10 Гц. Исследование показывает, что градиентные бидоменные структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  могут быть использованы в качестве элемента для создания высокочувствительных самонамагничивающихся датчиков токов и магнитных полей.

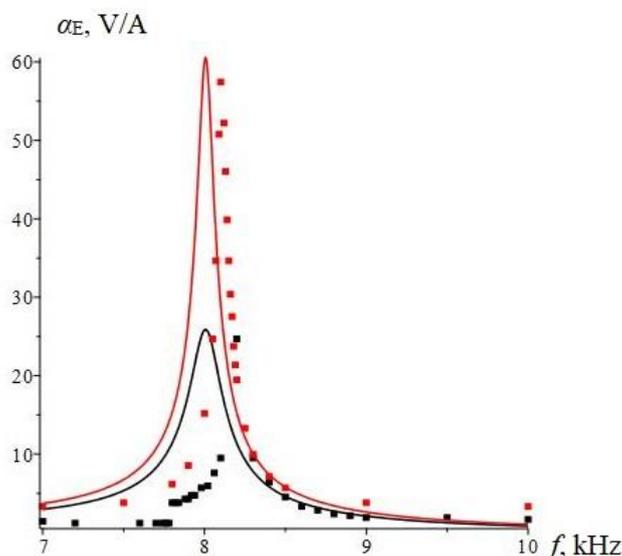


рис.1. Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты без поля подмагничивания. Сплошная линия – теоретическая зависимость, черные точки – экспериментальная зависимость структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Metglas}$ , красные точки – экспериментальная зависимость градиентной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ .

Как видно из рис. 2, чувствительность достигает значения 0,41 В/А (без использования усилителя). Результаты показывают высокую практическую значимость для прикладных применений.

Использование этой градиентной бидоменной структуры позволит значительно снизить уровень магнитного шума, повысить чувствительность, а также уменьшить габаритные размеры устройства, поскольку нет необходимости использовать постоянный магнит и усилитель.

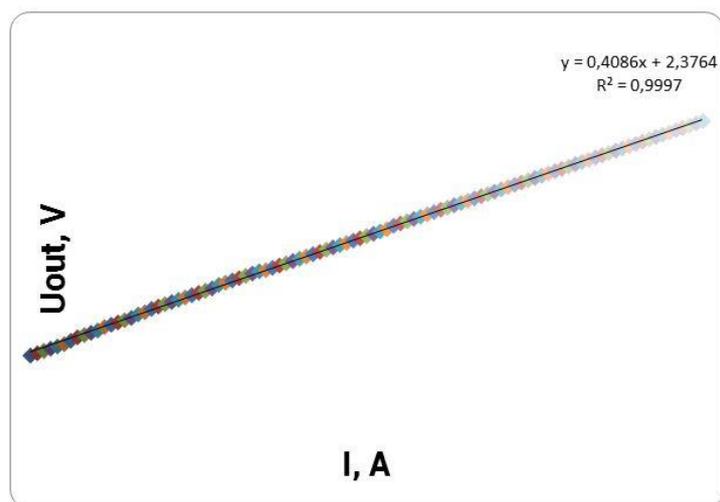


рис.2. Выходная зависимость МЭ датчика тока.

Значение МЭ коэффициента по напряжению для образца  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  составляет  $\alpha_{\text{ME}} = 57.4$  без поля смещения. Показано, что значение МЭ коэффициента по напряжению без поля смещения в образце  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  значительно выше, чем в структуре  $\text{LiNbO}_3 / \text{Metglas}$ .

Полученные результаты открывают широкие возможности для практического применения градиентной бидоменной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  в качестве чувствительного элемента для разработки высокочувствительных датчиков тока и магнитного поля.

Предлагаемый датчик тока может использоваться в измерительной технике, в электрических сетях и системах управления, системах безопасности; в металлоискателях; в автомобильной промышленности; на железнодорожном транспорте; в беспроводных системах учета; в космической технике и робототехнике; в медицине.

Преимуществами датчика тока на основе бидоменной градиентной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  являются высокая чувствительность, низкое энергопотребление, большой диапазон выходного напряжения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-57-53001.

Список публикаций:

[1] *Modern Sensors Handbook* R.Pavel, T. Alois., Eds.; ISTE Ltd, 2007, 518p.

[2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov, A.S. Tatarenko. *Magnetolectric Composites*. Pan Stanford Publ., Singapore, 2019, 280p.

## Магнитоэлектрический магнитокардиограф

*Лобекин Вячеслав Николаевич*

*Козонов Александр Юрьевич*

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.*

*[slavalobekin@gmail.com](mailto:slavalobekin@gmail.com)*

В современном мире идет тенденция создания малогабаритных, портативных, мобильных устройств, работающих при комнатной температуре, которые позволят быстро и точно проводить измерения и диагностику необходимых данных. Одним из таких устройств является магнитоэлектрический (МЭ) магнитокардиометр, работающий на МЭ эффекте, способный детектировать магнитную составляющую человеческого сердца. В отличие от СКВИД магнитометров системы на МЭ эффекте позволяют детектировать малые магнитные поля при комнатной температуре и без специальных условий, необходимых для проведения измерений [1].

Первая магнитокардиограмма (МКГ) была записана Baule and McFee в 1963 г. [2]. Их способ измерения магнитного поля сердца человека осуществлялся с помощью пары медных индукционных катушек вокруг ферромагнитного сердечника при комнатной температуре в неэкранированном окружении. Биоманнитные

сигналы человеческого тела предоставляют много полезной информации о сердце. Сигналы МКГ возникают в результате протекания электрических токов в активных нервных клетках сердца. Сигнал сердца взрослого человека является самым большим из биологических магнитных сигналов с максимальной величиной около 25 пТл.

Для каждого источника биомагнитного сигнала можно определить необходимые пределы обнаруживаемой напряженности и частоты магнитного поля. Сегодня, для исследования таких низкочастотных биологических магнитных сигналов, используют СКВИД магнитометры, но они дорогостоящие, крупногабаритные и требуют низких температур. Разработка МЭ магнитокардиометра на основе высокочувствительного МЭ датчика магнитного поля, работающего при комнатной температуре, позволит решить проблемы СКВИД магнитометров, за счет таких преимуществ, как: низкая стоимость, широкий диапазон частот и простота в изготовлении. МЭ датчик магнитного поля на основе МЭ композитных структур, является основным элементом портативного, мобильного МЭ магнитокардиометра [3,4].

В качестве чувствительного элемента МЭ датчика предлагается использовать композитную структуру

(Рис.1), состоящую из магнитоэлектрического элемента, выполненного в форме пластины из пьезоэлектрика, например, AlN или LiNbO<sub>3</sub> и пластин магнитострикционного материала, например, Метгласа.

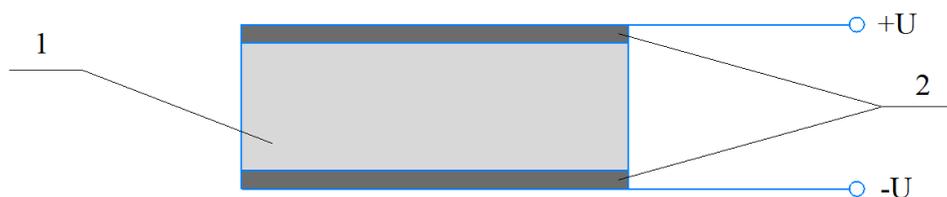


рис. 1 - Магнитоэлектрическая структура: 1 – пластина пьезоэлектрика AlN или LiNbO<sub>3</sub>; 2 – пластины Метгласа.

На рис. 2 представлена структурная схема МЭ магнитокардиометра. Принцип работы такого МЭ магнитокардиометра заключается в следующем: полученный сигнал магнитной составляющей сердца детектируется МЭ датчиком, затем передается на малошумящий усилитель, например, AD745, AD7195, или ОРА627 и далее сигнал поступает в систему цифровой обработки сигнала, в которую входят фильтр низких частот, преобразователь АС/DC и АЦП и в дальнейшем, посредством беспроводной передачи, сигнал поступает на персональный компьютер с получением изображения в интерфейсе Lab View.

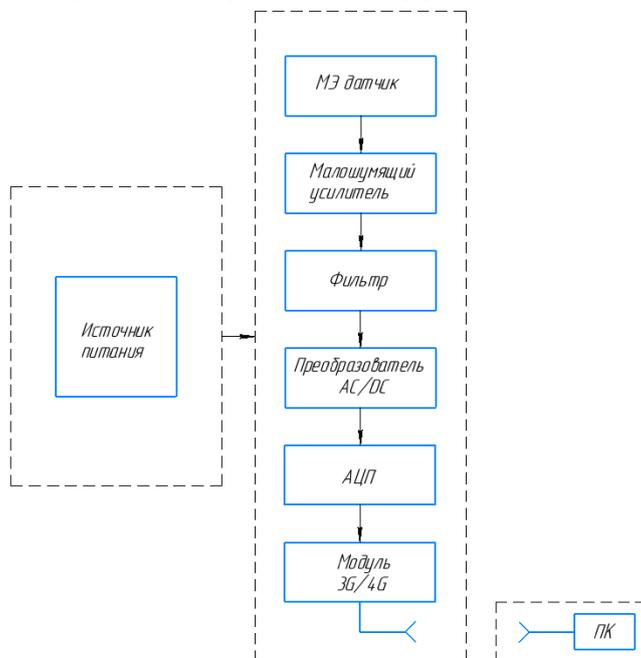


рис. 2 - Структурная схема магнитоэлектрического магнитокардиометра.

Разработка портативного, мобильного МЭ магнитокардиометра, работающего на МЭ эффекте, позволит перейти к абсолютно новому классу биомедицинских, измерительных, мобильных систем, решая проблемы существующих систем для измерения слабых магнитных полей человека, таких как, СКВИД магнитометры, а

именно крупные габариты, высокая стоимость, низкая рабочая температура, сложность изготовления. Разработанный портативный, мобильный МЭ магнитокардиометр будет обладать высокой чувствительностью порядка 5 пТл, работать при комнатной температуре и позволит детектировать магнитную составляющую человеческого сердца.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00391.

Список публикаций:

- [1] V.N. Lobekin, R.V. Petrov, M.I. Bichurin, A.V. Rebinok, R.A. Sulimanov, «Magnetolectric sensor for measuring weak magnetic biological fields», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 441 (2018), p. 9.  
[2] Baule G, Mcfee R. detection of the magnetic field of the heart. *Am Heart J*. 1963 Jul;66:95-6. doi: 10.1016/0002-8703(63)90075-9. PMID: 14045992.  
[3] Reermann, J.; Durdaut, P.; Salzer, S.; Demming, T.; Piorra, A.; Quandt, E.; Frey, N.; Höft, M.; Schmidt, G. Evaluation of magnetolectric sensor systems for cardiological applications. *Measurement* 2018, 116, 230–238.  
[4] Bichurin, M.; Petrov, R.; Sokolov, O.; Leontiev, V.; Kuts, V.; Kiselev, D.; Wang, Y. Magnetolectric Magnetic Field Sensors: A Review. *Sensors* 2021, 21, 6232. <https://doi.org/10.3390/s21186232>.

## Моделирование сплит-кольцевого резонатора со структурой метаматериалов с ферритовым элементом

Лобекин Вячеслав Николаевич

Лаврова Ирина Германовна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Татаренко Александр Сергеевич, к.т.н.

[slavalobekin@gmail.com](mailto:slavalobekin@gmail.com)

В последнее время многие устройства и компоненты с улучшенными характеристиками были разработаны и исследованы на основе структур со свойствами метаматериалов. Основой таких устройств являются резонаторы, в частности, сплит-кольцевые резонаторы с узким зазором (SRR). Эти новые компоненты определены как устройства со свойствами метаматериалов. Преимущества этих резонаторов или элементов на их основе заключаются в их очень маленьком субволновом размере, что обеспечивает возможность создания компактной схемы и таких компонентов, как фильтры. Метаматериалы - это инженерные материалы, которые демонстрируют контролируемые электромагнитные характеристики, не встречающиеся в природе. Предмет метаматериалов привлек большое внимание к исследованиям от сверхвысоких до высоких терагерцевых и оптических частот, и многие устройства с новыми или улучшенными функциональными возможностями разработаны на основе концепции искусственного материала [1-3].

В данной работе рассматривается структура на основе сплит-кольцевого резонатора с добавлением ферритового элемента. Включение ферритового элемента позволяет осуществить электронную перестройку резонансных характеристик с помощью магнитного поля.

Для моделирования выбрана структура сплит-кольцевого резонатора со свойствами метаматериалов с ферритовым элементом ЖИГ, представленная на *рис. 1*. Конструкция выполнена на подложке Duroid 6010.2LM размерами 30x24 мм и толщиной 1,90 мм, с относительной диэлектрической проницаемостью 10,2 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0023. Микрополосковая линия передачи является элементом возбуждения с волновым сопротивлением 50 Ом, сплит-кольцевой резонатор и заземление выполнено из меди с толщиной металлизации 0,035 мм [4]. В качестве ферритового элемента используется железо-иттриевый гранат.

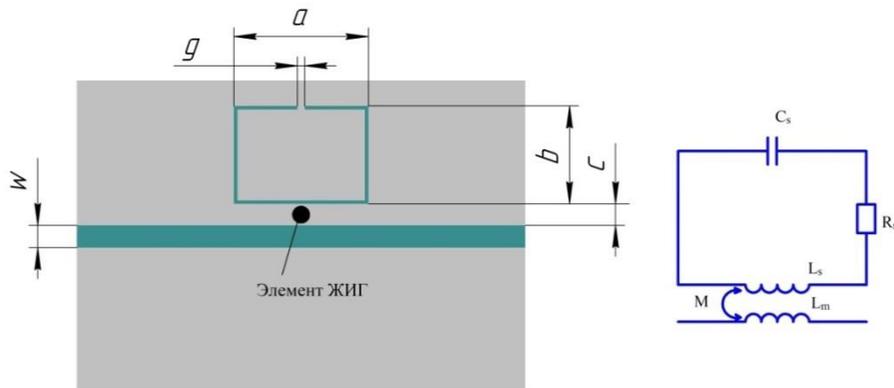


рис 1. – Структура сплит-кольцевого резонатора на основе метаматериалов с ферритовым элементом:  $a=7$  мм,  $b=7.5$  мм,  $w=1.7$  мм,  $c=0.65$  мм,  $g=0.15$  мм.

Компьютерное моделирование проводилось в программе ANSYS HFSS, являющейся инструментом для трехмерного моделирования ВЧ/СВЧ электромагнитных полей. Технология HFSS позволяет выполнять расчет электрических и магнитных полей, токов, S параметров и излучений. Процесс выполнения расчета полностью автоматизирован, пользователю необходимо задать геометрические параметры, свойства материалов и расчетные характеристики. Основным расчетным параметром, получаемым при компьютерном моделировании, является параметр  $S_{21}$ , являющийся коэффициентом передачи. В результате моделирования получена амплитудно-частотная характеристика, представленная на рис. 2.

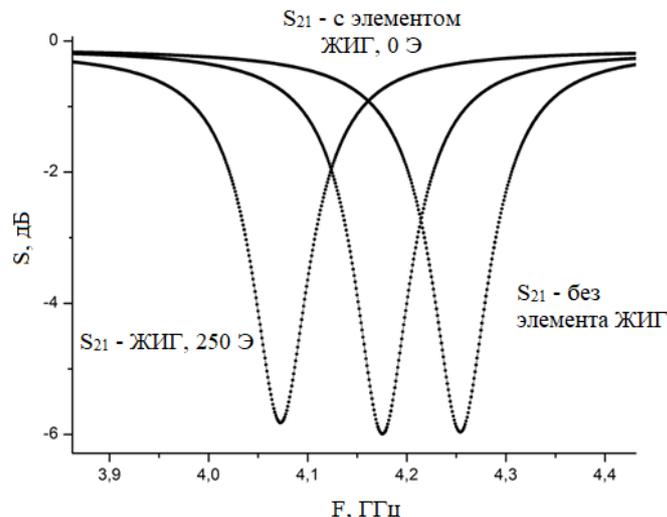


рис.2 – Амплитудно-частотная характеристика сплит-кольцевого резонатора на основе метаматериалов.

Полученные результаты моделирования показывают, что при добавлении ферритового элемента ЖИГ и приложении к нему магнитного поля, в структуру сплит-кольцевого резонатора, осуществляется электронная перестройка резонансной характеристики. При величине магнитного поля  $H_0=250$  Э, сдвиг резонансной кривой составил 180 МГц относительно структуры без добавления элемента ЖИГ. На основе полученных результатов, можно сделать вывод, что использование метаматериалов и ферритовых элементов позволяет проектировать новые управляемые устройства с использованием метаматериалов и ферритовых элементов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00391.

Список публикаций:

- [1] S. Sunbeam Islam, M. R. Iqbal Faruque, M. Tariqul Islam, Md. Moinul Islam, and N. Misran "New NRI Metamaterial for Multi-band Operation," *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 8, 2016, pp. 171-173.
- [2] S. Sunbeam Islam, M. R. Iqbal Faruque, and M. Tariqul Islam, "A new direct retrieval method of refractive index for the metamaterial," *Current Science*, vol. 109, 2015, pp. 337-342.
- [3] W. Withayachumnankul, C. Fumeaux, and D. Abbott, "Compact electric-LC resonators for metamaterials," *Optics Express*, vol. 18, 2010, pp. 25912-25921.
- [4] W. Withayachumnankul, K. Jaruwongrungsueb, A. Tuantranont, C. Fumeaux and D. Abbott, "Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization," *Sensors and Actuators*, vol. 189, 2013, pp. 233-237.

## Структура и связанная динамика вихрей в спин-трансферном наноосцилляторе под воздействием спин-поляризованного тока и внешнего магнитного поля

**Мухамадеева Виктория Владимировна**

Степанов Станислав В., Антонов Георгий И., Левашова Ирина Андреевна, Саломасов Андрей Михайлович

Башкирский государственный университет

Екомасов Евгений Григорьевич, д.ф.-м.н.

[mukhamadeeva.vika@mail.ru](mailto:mukhamadeeva.vika@mail.ru)

В настоящее время одним из перспективных технических устройств для спинтроники, является микроволновой спин-трансферный наноосциллятор (СТНО) [1, 2]. В его основе обычно лежат мультислойные наностолбики, которые имеют два магнитных слоя различной толщины, разделенных немагнитной прослойкой (Рисунок 1) [2, 3]. В магнитных слоях может существовать, как основное состояние, магнитный вихрь. Появилось много работ, посвященных исследованию вихревых СТНО, когда вихрь существует в каждом из

магнитных слоев (см., например, [4, 5]). Показано, что для системы из двух взаимодействующих магнитостатически магнитных вихрей магнитных дисков, динамика вихрей может кардинально измениться по сравнению с одновихревым СТНО. Также экспериментально показана возможность раздельного переключения полярности каждого из вихрей при совместном приложении магнитного поля и спин-поляризованного тока.

Исследуемые в данной работе СТНО имеют магнитные слои из пермаллоя толщиной 4нм и 15нм разделенные немагнитной прослойкой меди толщиной 10нм. С помощью численного решения обобщенного уравнения Ландау-Лифшица изучена динамика двух магнитостатически связанных магнитных вихрей под действием внешнего магнитного поля и спин-поляризованного электрического тока.

Рассмотрено влияние изменения толщины немагнитной прослойки на связанную динамику вихрей на примере СТНО малого диаметра (120 нм). В данной работе применяется увеличение немагнитного слоя с 10нм до 15нм, а также его уменьшение до 5нм. Показано, что при увеличении толщины немагнитной прослойки наблюдается сдвиг величины критических токов в меньшую сторону, а диапазон токов, при котором наблюдается стационарный режим связанных колебаний вихрей, увеличивается. При достаточно малой толщине немагнитного слоя может меняться сценарий возможной динамики вихря в тонком слое: вихрь не покидает границы диска, а переключается по динамическому сценарию в пределах рассматриваемого малого радиуса.

Также исследован процесс переключения полярности магнитных вихрей при совместном воздействии спин-поляризованного тока и внешнего магнитного поля на СТНО большого (400нм) диаметра. Построена диаграмма зависимости от величины спин-поляризованного тока величины магнитного поля, раздельно переключающего полярность вихря в магнитных слоях спин-трансферного наноосциллятора. Показано, что для раздельного переключения полярности вихрей в СТНО большого диаметра требуется использования меньшей величины магнитного поля по сравнению со случаями среднего и малого диаметров СТНО, что более выгодно с точки зрения практических приложений.

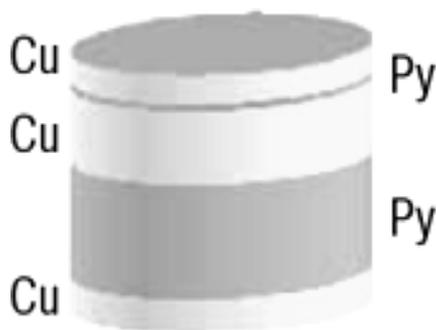


рис 1. Проводящий наностолбик с двумя слоями пермаллоя(Py), разделенные немагнитной прослойкой меди.

#### Список публикаций:

1. Guslienko K.Yu. // *Magnetic vortex state stability, reversal and dynamics in restricted geometries* // *J. Nanosc. Nanotechnol*, 2008 - v. 8, 2745-2760 (2008)
2. Звездин А.К., Звездин К.А., Хвальковский А.В. // *Обобщенное уравнение Ландау-Лифшица и процессы переноса спинового момента в магнитных наноструктурах*. УФН, 178, 436-442 (2008).
3. Екомасов А. Е., Степанов С. В., Звездин К. А., Екомасов Е. Г. // *Влияние перпендикулярного магнитного поля и поляризованного тока на динамику связанных магнитных вихрей в тонкой наностолбчатой проводящей трехслойной структуре* - *ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ*, 2017, том 118, № 4, с. 345–351.
4. Ekomasov A., Stepanov S., Zvezdin K., Ekomasov E. // *Spin current induced dynamics and polarity switching of coupled magnetic vortices in three-layer nanopillars* // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 471. P. 513–520.
5. Екомасов Е.Г., Степанов С.В., Звездин К.А., Пугач Н.Г., Антонов Г.И. // *Влияние спин-поляризованного тока на динамику и изменение структуры магнитных вихрей в трехслойном проводящем наноцилиндре большого диаметра* / *Физика металлов и металловедение* – № 3, т. 122. – 2021. – С. 212-220.

## Фрагментация падающих капель магнитной жидкости

Орехова Светлана Михайловна

Закинян Анастасия Александровна, Закинян Артур Робертович  
Северо-Кавказский федеральный университет

Закинян Артур Робертович  
[lanafox189@mail.ru](mailto:lanafox189@mail.ru)

Гидродинамические неустойчивости возникают во многих природных явлениях, а также в промышленных процессах. Широкий научный интерес представляют исследования эффектов неустойчивости в достаточно хорошо регулируемых условиях, которые могли бы дать представление об основных механизмах неустойчивости. В настоящей работе был рассмотрен один из наиболее простых видов неустойчивости – это фрагментация капли [1]. Дополнительные возможности в, подобного рода, исследованиях открываются благодаря применению намагничивающихся жидких сред.

Была проведена серия экспериментов для исследования фрагментации падающих капель ферромагнитной жидкости в жидкой немагнитной среде под воздействием магнитного поля. Однородное магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца. Методика исследования заключалась в следующем. Вертикально установленную тонкую плоскую прозрачную ячейку (ячейка Хеле-Шоу) наполняли авиационным маслом или керосином. Затем при помощи шприца через верхнее отверстие в ячейке капали магнитную жидкость. После этого происходило включение источника тока, питающего катушки Гельмгольца. Изучался момент фрагментации капель, его зависимость от величины и направления магнитного поля. (рис. 1, 2).

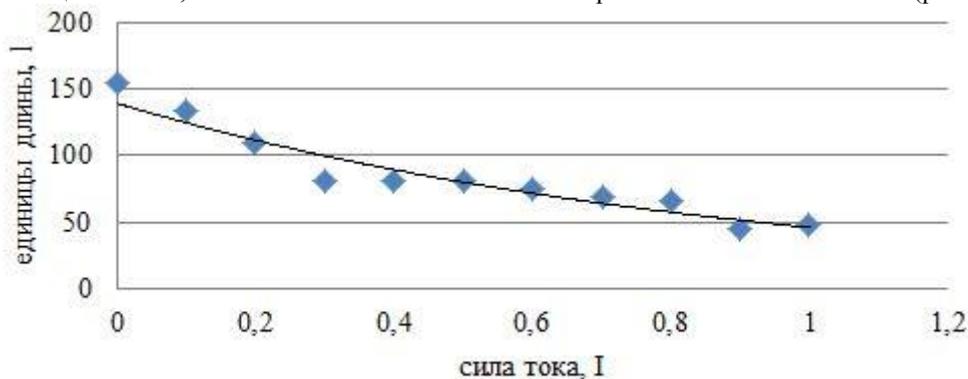


рис.1. Зависимость возникновения момента начала фрагментации капель ферромагнитной жидкости от силы тока, подаваемого на катушки. Среда – масло, поле – горизонтально направленное «от наблюдателя».

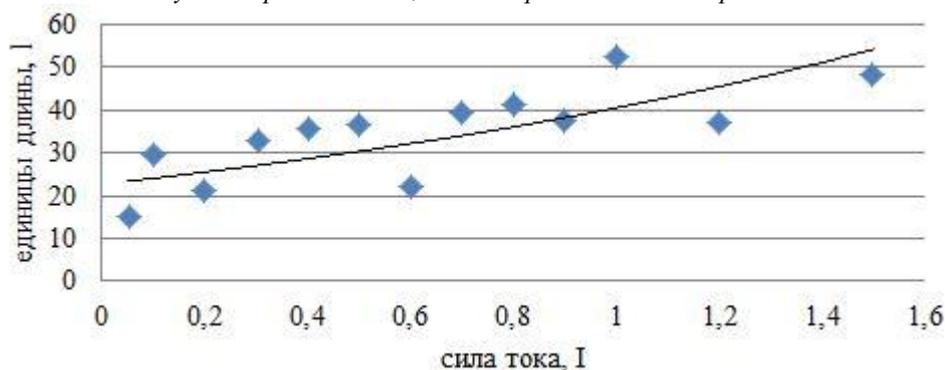


рис.2. Зависимость возникновения момента начала фрагментации капель ферромагнитной жидкости от силы тока, подаваемого на катушки. Среда – керосин, поле – горизонтально направленное «от наблюдателя».

Было выявлено, что при движении капли магнитной жидкости в керосине происходит больше последовательных фрагментаций капли, чем в авиационном масле. Это происходит из-за того, что основной используемой магнитной жидкости являлся додекан, который не имеет межфазного натяжения на границе с керосином, тогда как на границе с маслом действует межфазное натяжение. Были проведены измерения длины пути, который проходит капля до первого акта фрагментации. Оказалось, что, как в случае с керосином, так и с авиационным маслом, длина пути капли существенно зависит от магнитного поля. Так, при воздействии магнитного поля, направленного вдоль движения капли (вертикально), длина пути возрастает. Воздействие магнитного поля, перпендикулярного плоскости ячейки, приводит к сокращению длины пути капли до первого деления. Аналогичный эффект производит воздействие горизонтально направленного магнитного поля,

ориентированного вдоль плоскости ячейки. Таким образом, имеет место возможность управления закономерностями проявления неустойчивости и распада подающих капель магнитной жидкости при помощи магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке Северо-Кавказского центра математических исследований в рамках соглашения № 075-02-2021-1749 с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Список публикаций:

[1] A. Garcimartin, H.L. Mancini and C. Perez-Garcia, *Europhys. Lett.*, 19 (1992) 171.

**Магнитоэлектрический резистор на основе  
магнитоэлектрично – пьезополупроводниковой структуры  
Metglas/GaAs/Metglas**

*Петров Дмитрий Александрович*

*Козонов Александр Юрьевич*

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.*

*[s182335@std.novsu.ru](mailto:s182335@std.novsu.ru)*

Важнейшей задачей, стоящей сегодня перед электронной промышленностью страны, является разработка и внедрение новой отечественной высокочувствительной электронной компонентной базы и дальнейшее совершенствование радиоэлектронной аппаратуры в современных условиях. Решить эту задачу возможно за счет освоения в производстве новых приборов и устройств, относящихся к приборам магнитоэлектрической (МЭ) электроники в широком диапазоне частот. Появление подобных приборов и устройств обусловлено применением новых уникальных по своим свойствам материалов, структур и технологий их производства. Создание активных МЭ приборов, на основе разработанных физических принципах, будет способствовать развитию отечественной электроники. Систематический анализ доступных материалов в отечественной и зарубежной научно-технической литературе подтверждает, что на протяжении последних лет наблюдается постоянно возрастающий интерес к исследованию и разработке МЭ приборов в области низких частот и электромеханического резонанса. Однако, до последнего времени большинство исследований проводились исключительно с целью создания пассивных МЭ структур, приборов и устройств, таких как, МЭ датчики магнитного поля, датчики тока, гираторы и т.д. И только в последнее время стали появляться работы по исследованию пьезополупроводниковых материалов, которые могут быть взяты за основу при разработке активных МЭ приборов. Более того, в настоящее время, как в России, так и за рубежом, практически отсутствуют работы по разработке физических принципов создания активных низкочастотных приборов на основе МЭ эффекта.

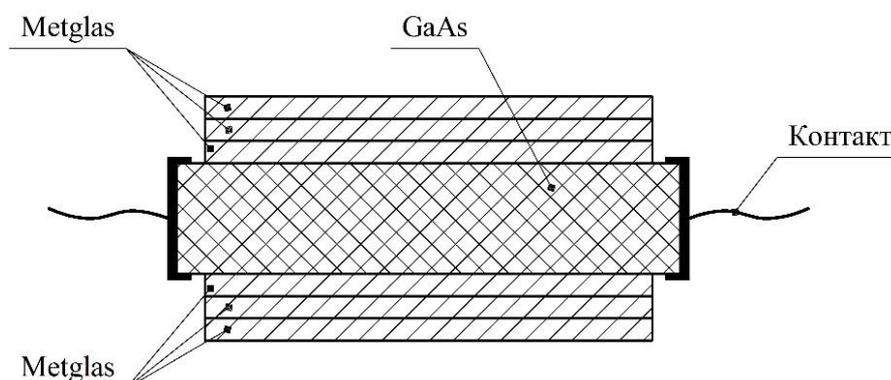


рис. 1 – Структура магнитоэлектрического резистора

На рис.1 предложен МЭ резистор, состоящий из магниторезистивного полупроводникового материала, работающий в области ЭМР, для управления сопротивлением резистора и двух омических контактов. В качестве магниторезистивного полупроводникового материала применена композиционная магнитоэлектрично – пьезополупроводниковая структура с градиентом намагниченности, образованная высокоомной подложкой арсенид галлия (GaAs) и магнитоэлектричным слоем, состоящим из метгласа (Metglas) и никеля (Ni).

Благодаря наличию в рассматриваемой структуре МЭ эффекта возможно резонансное увеличение магнитной чувствительности к магнитному полю в области электромеханического резонанса с использованием различных типов колебаний (продольной, поперечной, толщиной, изгибной, сдвиговой, крутильной мод). Предлагаемое решение позволяет получить повышение чувствительности резисторов к магнитному полю.

Таким образом, предлагаемая конструкция МЭ резистора позволяет повысить чувствительность датчиков магнитного поля, электрического тока, преобразователей, источников возобновляемой энергии, устройств медицинской техники и других устройств. На основе предложенной конструкции МЭ резистора появляется возможность создания активных МЭ полупроводниковых приборов и устройств.

Список публикаций:

[1] Д.А. Петров, В.С. Леонтьев, Г.А. Семенов, С.Н. Иванов, О.В. Соколов, А.Ю. Козонов, К.А. Сыроварова, К.В., Семенова, М.И. Бичурин Исследование магнитострикционно – пьезополупроводниковой структуры *Metglas/GaAs/Metglas* для практических применений, *IOP Conf. Series: Journal of Physics*, 2021.

[2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, V.S. Leontiev, S.N. Ivanov, O.V. Sokolov *Magnetolectric effect in layered structures of amorphous ferromagnetic alloy and gallium arsenide. JMMM* 424, p.115–117 (2017).

## Магнитоэлектрический эффект в объемных мультиферроидных композиционных материалах

*Ромазев Павел Евгеньевич*

*Луницкая Юлия Александровна*

*Челябинский государственный университет*

*Луницкая Юлия Александровна*

*[paulcoolpaul174@gmail.com](mailto:paulcoolpaul174@gmail.com)*

В настоящее время особый интерес представляют исследования свойств материалов, обладающих свойствами мультиферроиков. В связи с этим большое внимание уделяется поиску материалов, сочетающих традиционные (магнитные, пьезоэлектрические, диэлектрические) и принципиально новые (гибридные) свойства.

В мультиферроидных композитах, содержащих пьезоэлектрические и ферромагнитные компоненты, магнитоэлектрический эффект возникает в результате комбинации магнитострикции и пьезоэффекта посредством механической связи между компонентами, а в случае применения переменных полей наблюдается резонансное усиление на частоте электромеханического резонанса [1]. В отличие от однофазных магнитоэлектрических материалов, - эффективность магнитоэлектрических взаимодействий в гетерогенных структурах (мультиферроидных композитах) можно повысить за счет подбора компонентов магнитных материалов с большим пьезомагнитным коэффициентом и высокой намагниченностью насыщения, а также электрических материалов с высоким пьезомодулем и малыми диэлектрическими потерями.

Так, к числу хорошо изученных и широко применяемых на практике в качестве пьезоэлектрической компоненты в мультиферроиках относятся соединения на основе цирконата-титаната свинца, характеризующиеся высокими диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами при комнатной температуре. В качестве магнитной компоненты в основном используют материалы семейства  $\text{MeFe}_2\text{O}_4$  ( $\text{Me} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}$ ) с высокими значениями магнитострикционных констант [2].

Одним из перспективных направлений практического использования композиционных феррит-пьезоэлектрических материалов является разработка необходимых в современной СВЧ- и микроэлектронной технике [3] функциональных устройств (датчиков магнитных полей, фазовращателей, модуляторов электромагнитных волн), способных работать в широком частотном диапазоне. Получить такие материалы возможно методом твердофазной реакции по типу статистической смеси в системе  $(1-x)\text{PZT} + x\text{CF}$  в интервале мольного изменения  $(0.1 \leq x \leq 0.5)$  исходных компонентов при спекании на воздухе. Совмещая магнитострикционные и пьезоэлектрические характеристики соединений, входящих в состав исследуемой системы, следует ожидать формирования композита с улучшенными электрофизическими свойствами.

В работе методом твердофазной реакции на воздухе синтезированы однофазные керамические композиционные феррит-пьезоэлектрические материалы с высокой степенью кристалличности и установлено, что совмещение пьезоэлектрической и ферромагнитной фаз в образцах композитной системы  $(1-x)\text{PZT} + x\text{CF}$   $(0.0 \leq x \leq 0.5)$  приводит к появлению гибридных свойств (значения диэлектрической и магнитной проницаемостей) и эффектов (изменению величины комплексной диэлектрической проницаемости во внешнем магнитном поле). В исследованных композиционных материалах выявлен резонансный характер

магнитодиэлектрического эффекта, что обусловлено его максвелл-вагнеровским механизмом возникновения. При наложении постоянного магнитного поля (0.1 Тл) максимальная величина магнитоэлектрического коэффициента была достигнута в образце состава 0.8PZT-0.2CF, значение которой не превышало 0.7 мВ.

Список публикаций:

[1] Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K., Stashkevich A.A. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. Vol. 405. P. 244.

[2] Bayrakdar H., Yalcin O., Vural S., Esmer K. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. Vol. 343. P. 86.

[3] Fedii A.A., Kalganov D.A., Filonenko E.M., Yaroshenko F.A., Bezborodova P.A., Lupitskaya Yu.A. // *Физика твердого тела*. 2021. Т. 63(11). С. 1774.

## Магнитоэлектрический тиристор

Семенова Ксения Витальевна

Сыроварова Кристина Андреевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

[semenovaksu@icloud.com](mailto:semenovaksu@icloud.com)

Тиристор это полупроводниковый компонент, основная функция которого состоит в управлении электрическим током высокой мощности при получении маломощного управляющего сигнала. Эквивалентная схема тиристора представляет собой схему, состоящую из двух транзисторов. Таким образом, чувствительность к магнитному полю тиристора можно охарактеризовать чувствительностью к магнитному полю транзисторов. Впервые чувствительность тиристоры к магнитному полю была показана в работе [1].

В настоящее время полупроводниковые магниточувствительные тиристоры широко применяются в современной технике, например, в управляемых выпрямителях и переключателях. Магнитное поле электрически изолировано от магниточувствительных тиристоры – в этом и состоит уникальность таких приборов. Величина необходимого постоянного магнитного поля для работы магнитоэлектрического тиристора составляет единицы Тл, что является их основным недостатком. Устранение данного недостатка стало возможным появлению новых материалов и различным эффектам, например, магнитоэлектрического эффекта [2-3]. Разработка магнитоэлектрического тиристора позволит повысить чувствительность устройства и уменьшить величину необходимого постоянного магнитного поля за счет работы в режиме прямого магнитоэлектрического эффекта.

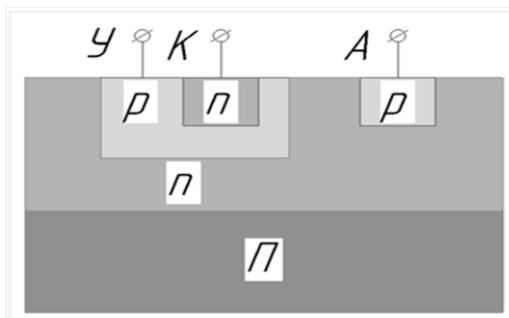


рис.1– Структура магнитоэлектрического тиристора: А – анод, К – катод, У – управляющий электрод, П – подложка;

Структура магнитоэлектрического тиристора аналогична типичной четырехслойной p-n-p-n структуре, состоящей из двух транзисторов: p-n-p и p-n-p. Магнитоэлектрический тиристор можно представить в виде тиристора, состоящего из подложки, анода, катода и управляющего электрода [4]. Материалом подложки может служить композиционная магнитоэлектрически-пьезополупроводниковая структура с градиентом намагниченности на основе высокоомной пьезополупроводниковой подложки - арсенида галлия (GaAs) и магнитоэлектрического слоя – Метгласа. Схема предлагаемого устройства показана на рисунке 1. Планируется продолжить исследование характеристик предложенного магнитоэлектрического тиристора.

Список публикаций:

[1] Стафеев В.И., Каракушан Э.И. *Магнитодиоды*. - М.: Наука, 1975. - 216 с

[2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. Modeling of magnetoelectric effect in ferromagnetic/piezoelectric multilayer composites // *Ferroelectrics*, vol. 280, pp. 165–175, 2002

[3] *Magnetoelectricity in Composites* // Eds. M. Bichurin and D. Viehland / Pan Stanford Publishing, Singapore 2011. – 286 p

[4] Викулин И.М. *Магниточувствительные полупроводниковые сенсоры: В43 монография* / Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Горбачев В.Э. – Одесса, 2016. – 144 с

## Магнитоэлектрический транзистор

Сыроварова Кристина Андреевна

Семенова Ксения Витальевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

[crstnaa@icloud.com](mailto:crstnaa@icloud.com)

Среди известных полупроводниковых преобразователей магнитного поля выделяют магниточувствительные транзисторы, параметры которых оптимизированы для получения чувствительности тока, протекающего через транзистор к магнитному полю [1].

Недостатками известных магнитных транзисторов являются низкая магниточувствительность и необходимость больших магнитных полей подмагничивания (единицы Тл).

Для увеличения магнитной чувствительности транзистора предлагается использовать слоистую композиционную магнитоэлектрично-пьезополупроводниковую структуру, позволяющую снизить требования по подмагничивающему полю при работе в режиме прямого магнитоэлектрического (МЭ) эффекта.

Предлагаемая структура магнитоэлектрического (МЭ) транзистора использует в качестве основы полевой транзистор. МЭ полевой транзистор представляет собой транзистор, состоящий из подложки, области проводящего канала, истока, стока и затвора. В качестве подложки предлагается использовать двухслойную композиционную магнитоэлектрично-пьезополупроводниковую структуру на основе высокоомной пьезополупроводниковой пластины (например, арсенид галлия (GaAs)) и магнитоэлектричного слоя (например, Метглас или никель) [2].

В качестве материала проводящего канала, по аналогии с [3], предлагается использовать слой полупроводникового материала GaAs, в котором возможно управление током с помощью магнитного поля, воздействующего на магнитный слой, в режиме прямого МЭ эффекта.

На рисунке 1 представлена схема устройства.

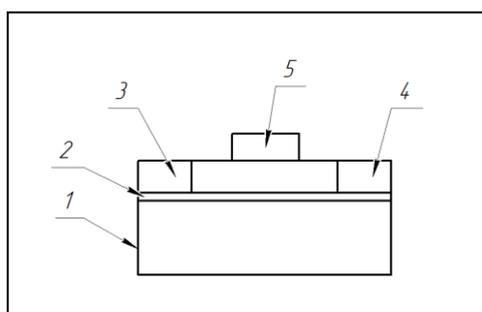


рис.1. Схема магнитоэлектрического полевого транзистора: 1 – композиционная магнитоэлектрично-пьезополупроводниковая структура; 2 – область проводящего канала; 3 – исток; 4 – сток; 5 – затвор

Так как работа данного прибора основана на применении магнитоэлектрично-пьезополупроводниковой структуры, возможно увеличение магнитной чувствительности к магнитному полю в режиме прямого МЭ эффекта.

Список публикаций:

[1] Бараночников М. Л. // Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 544 с.: ил.

[2] Бичурин М. И., Петров В. М., Филиппов Д. А., Сринивасан Г. // Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2005. – 226 с

[3] I. Stolichev et al, Nature Mater. 7, 464 (2008)

## Процессы перемагничивания магнитоодноосных плёнок с колумнарным дефектом в перпендикулярном и плоскостном полях

Филлипов Михаил Александрович

Вахитов Роберт Миннисламович, Ахметова Айгуль Альфредовна, Солонецкий Ростислав Владимирович

Башкирский государственный университет

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.

[mikhail.filippov.99@mail.ru](mailto:mikhail.filippov.99@mail.ru)

В последнее время активно изучается определённый тип магнитных материалов, в которых возможно существование магнитных скирмионов. Магнитные скирмионы—это вихреподобные магнитные неоднородности, несущие топологический заряд, которые впервые были обнаружены в киральных магнетиках [1]. Устойчивость скирмионных состояний в них обеспечивается объёмным взаимодействием Дзялошинского-Мория (DMI), которое проявляется в основном только при низких температурах. В случае же ультратонких многослойных плёнок, в которых реализуется межфазное DMI, магнитные скирмионы наблюдаются уже при комнатных температурах, но и здесь присутствуют проблемы с их стабильностью. При этом было выяснено, что магнитные скирмионы обладают рядом уникальных свойств: топологическая защищённость, возможность управления ими с помощью электрических токов малой плотности, малые размеры и другие. Исходя из этого, скирмионы весьма перспективны для использования в устройствах магнитной памяти нового поколения. Поэтому актуальным становится вопрос их стабилизации другими методами, без учёта DMI. Один из возможных способов как раз представлен в этой работе - образование стабильного скирмиона на колумнарном дефекте типа “потенциальная яма” в одноосной ферромагнитной плёнке. Чтобы использовать скирмионы в качестве носителей информации в запоминающих устройствах необходимо научиться управлять ими. В частности, это можно проделать с помощью магнитных полей. В связи со сказанным представляется интерес изучения процессов перемагничивания скирмионов в плоскостном и перпендикулярном магнитных полях.

В работе [2] уже был проведён теоретический анализ микромагнитных структур, которые возникают в магнитных плёнках с модулированной одноосной анизотропией, а также их сценарии перемагничивания. Исследования показали, что они бывают четырёх типов, два из которых представляют собой нетопологический солитон, а два — магнитный скирмион. Они различаются между собой ориентацией кора и направлением намагниченности на границе диска. Однако они имеют и общие топологические особенности; в их структуре можно выделить три участка вращения магнитных моментов: кор, промежуточный и граничный участки.

Наложение перпендикулярного магнитного поля  $\mathbf{H}$  приводит к трансформации структуры магнитных неоднородностей, в частности, магнитный солитон с ориентацией кора, противоположной полю  $\mathbf{H}$ , перемагничивается в три этапа: вначале уменьшаются размеры кора, затем при его критическом значении  $H_c$  переключается ориентация кора и скирмион превращается в нетопологический солитон. Последний с увеличением  $\mathbf{H}$  уменьшается в размерах, он как бы “испаряется” [2] и исчезает.

При действии же плоскостного магнитного поля на плёнку, перемагничивание сопровождается возникновением асимметрии распределения магнитных моментов в скирмионе: часть области промежуточного участка, в которой киральность спинов совпадает с направлением  $\mathbf{H}$ , расширяется за счёт уменьшения размеров области, в которой киральность спинов противоположна полю. При этом происходит сдвиг скирмиона в сторону уменьшающейся области. При критическом значении поля  $H_c$  скирмион скачком перемагничивается по направлению поля.

С помощью микромагнитного моделирования удалось подтвердить данные сценарии перемагничивания. Моделирование было осуществлено с помощью пакета программ открытого доступа OOMMF. Данный пакет основан на численном решении уравнения Ландау-Лифшица, которое описывает распределение намагниченности в магнетике с учётом размагничивающих полей. Решение производится методом конечных разностей. Устойчивое состояние скирмиона в отсутствии поля было обнаружено при следующих параметрах: диаметр диска 600 нм, толщина диска 30 нм, диаметр дефекта 60 нм,  $K_{u1}=3 \times 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> (вне дефекта),  $K_{u2}=-0.5 \times 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> (на дефекте),  $M_s=2 \times 10^5$  А/м,  $A=2.5 \times 10^{-13}$  Дж/м, фактор качества  $Q=1.19$  [3]. Размеры ячейки разбиения брались как  $2.5 \times 2.5 \times 2.5$  нм (рис.1). Радиус обнаруженного скирмиона, рассчитанный на основе полученных данных распределения намагниченности в радиальном направлении диаметра диска, составляет 33.54 нм.

Для обоих сценариев перемагничивания были определены критические значения магнитных полей. При приложении перпендикулярного поля критическое значение “переключения” кора  $H_c=123$  мТл, при превышении значения поля  $H=254$  мТл образец становится однородно намагниченным. При воздействии плоскостного поля при его критическом значении  $H_c=19.4$  мТл кор полностью вытесняется с дефекта и область дефекта становится полностью перемагниченной вдоль поля  $\mathbf{H}$ .

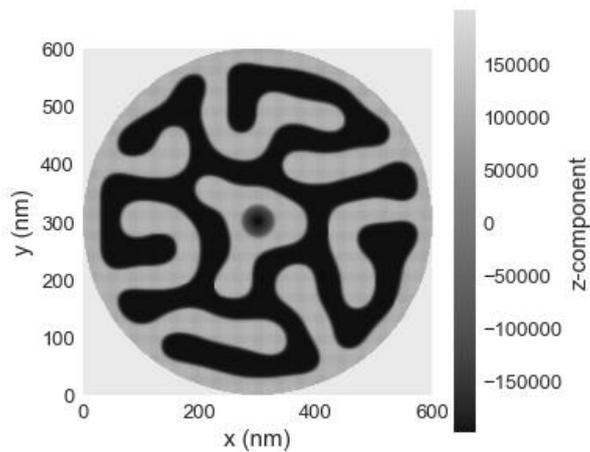


рис.1. Начальное равновесное состояние диска

Список публикаций:

[1] K.Everschor-Sitte, J.Masell, R.M.Reeve, M.Kläui, *Perspective: Magnetic skyrmions* // *J. Appl. Phys.* 2018. 124. 240901.

[2] R.M.Vakhitov, R.V.Solonetsky, A.A.Akhmetova // *J. Appl. Phys.* 2020. 128. 153904.

[3] M.V.Sapozhnikov, S.N.Vdovichev, O.L.Ermolaeva, N.S.Gusev, A.A.Fraerman, S.A.Gusev, Yu.V.Petrov // *Appl. Phys. Lett.* 2016. 109. 042406.

## 7 - Оптика и спектроскопия

Мошиченко Сергей Дмитриевич, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

### **Разработка инфракрасного ToF LIDAR**

Клещенков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [su\\_fullback@mail.ru](mailto:su_fullback@mail.ru) стр. 64

Трофимова Елена Сергеевна, аспирант 4 года обучения  
Москва, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, НИИ ядерной  
физики имени Д. В. Скобельцына МГУ, Физико-технологический институт

### **Люминесцентные свойства фосфатов, легированных редкоземельными ионами**

Пустоваров Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [trofimova.e.s@yandex.ru](mailto:trofimova.e.s@yandex.ru) стр. 66

## Разработка инфракрасного ToF LIDAR

Мошиченко Сергей Дмитриевич  
Южный федеральный университет  
Клещенков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.  
[su\\_fullback@mail.ru](mailto:su_fullback@mail.ru)

LIDAR (Light Detection and Ranging) - активный лазерный дальномер оптического диапазона. Управляя направлением излучения LIDAR в режиме развёртки, можно получить набор точек рельефа поверхности, от которой отражаются импульсы, и расстояний до этих точек. LIDAR используется в таких областях как: исследование атмосферы, геодезия, топография, машинное зрение, строительство, архитектура.

Целями данной работы являются изучение физического принципа работы устройств LIDAR, изучение существующих методов реализации этих устройств, проектирование и создание такого устройства, экспериментальная проверка его работы.

LIDAR состоит из оптической системы и специальной схемы [1]. Оптическая система как правило представляет из себя две собирающие линзы (рис.1), расположенные перед лазерным диодом и фотодиодом.

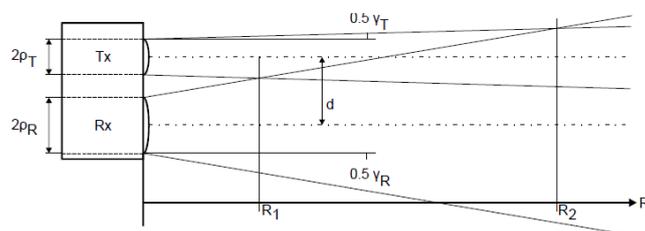


рис.1. Общий вид оптической системы LIDAR

Существуют несколько методов управления направлением лазерного луча LIDAR [2]: механический, микроэлектромеханический и метод оптической фазированной решётки.

Механический метод управления заключается во вращении системы зеркал, наклонённых таким образом, чтобы сформировать развёртку при прохождении по ним лазерного луча, исходящего от передатчика (рис.2). Этот метод является наиболее распространённым. Возможно подключение нескольких излучателей для покрытия всего окружения устройства. Серьёзными недостатками являются габариты и масса управляемого зеркала, а также повышенное энергопотребление всей системы.

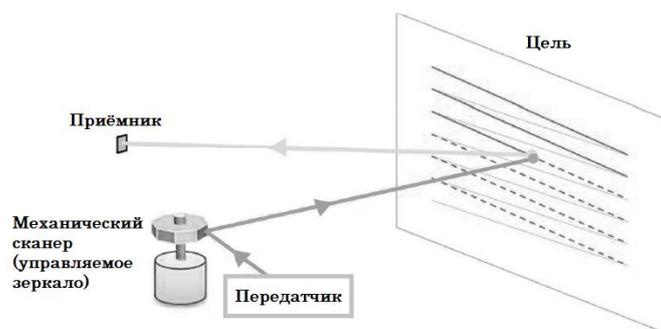


рис.2. Принцип работы сканирующего LIDAR на основе механического сканирования

Микроэлектромеханический метод управления заключается в управлении направлением лазерного луча при помощи малых зеркал с диаметром в несколько миллиметров. Эти зеркала направляются сервоприводами, управление которыми происходит с помощью микроконтроллера или иного цифрового устройства. В отличие от механического метода, возможно управление направлением по нескольким осям. Однако имеет место искажение изображения, связанное с непостоянной скоростью сканирования. Для минимизации этого эффекта необходимы сложные устройства, управляющие направлением зеркала.

Метод оптической фазированной решётки является аналогом фазированной решётки СВЧ диапазона. В результате изменения фазы когерентных источников, образующих решётку, происходит управление лучом, возникшем в результате интерференции излучений этих источников. Этот метод отличается от предыдущих отсутствием движущихся частей и повышенной скоростью сканирования. Однако, интенсивность излучения существующих оптических фазированных решёток не позволяет применять их для дальнего сканирования.

Устройство специальной схемы зависит от метода определения расстояния [3]: по времени пролёта (ToF) или по сдвигу фаз (AMCW). Для определения расстояния по времени пролёта используется таймер, измеряющий длительность промежутка времени между пиком напряжения на лазерном диоде и пиком напряжения на усилителе, подключённого к фотодиоду. Расстояние вычисляется по формуле:

$$R = \frac{c}{2} t_{of} \quad (1)$$

Для определения расстояния по сдвигу фаз используется таймер, тактирование которого происходит с внешнего источника. Промежуток времени, соответствующий сдвигу фаз между сигналом передатчика и сигналом приёмника, пересчитывается в сдвиг фаз. Зная эту величину и опорную частоту, можно определить расстояние до цели:

$$R = \frac{c}{2} \frac{\Delta\Phi}{2\pi f_M} \quad (2)$$

В разрабатываемом устройстве был применён метод определения расстояния по времени пролёта. Специальная схема осуществляет генерацию импульса, детектирование отражённого импульса и измерение интервала времени от фактического срабатывания лазерного диода до пика отражённого импульса. За управление направлением зеркала, управление генерацией импульсов, обработку и отправку результатов ToF внешнему устройству отвечает микроконтроллер (рис.3):

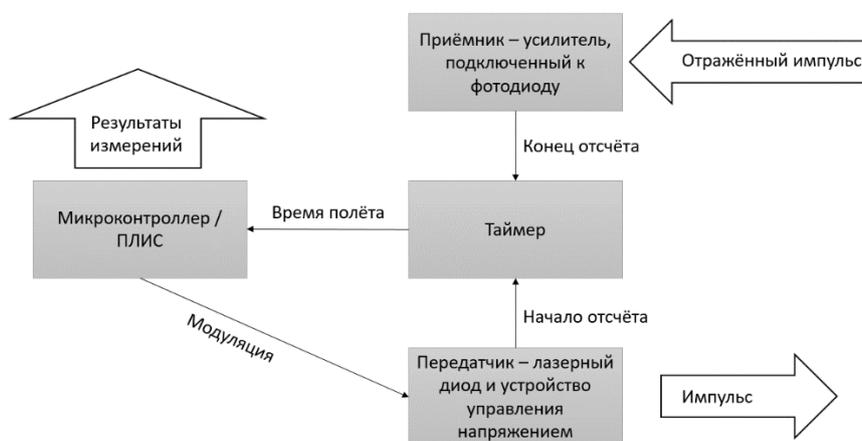


рис.3. Общий вид электрической схемы ToF LIDAR

Для отработки принципов построения был создан прототип ToF LIDAR. В созданном прототипе был реализован основной функционал для работы в режиме дальномера, а также реализована передача результатов измерений на внешнее устройство посредством интерфейса UART и последовательного порта USB. Была произведена настройка оптической системы для наилучшей фокусировки оптического импульса, получен устойчивый отклик на расстояниях до 10 метров. Полученное время полёта до статичной цели колебалось в пределах не более пятидесяти пикосекунд. Имел место постоянный сдвиг в сторону увеличения времени полёта в три наносекунды по сравнению с промежутком времени, измеренным осциллографом напрямую, связанный с особенностями распространения сигнала по печатной плате и обработки его различными устройствами схемы. За вычетом этого сдвига, рассчитанное расстояние соответствовало фактическому расстоянию с погрешностью 1.5 сантиметров.

Таким образом, разработанный прототип устройства ToF LIDAR позволяет довольно точно определять расстояния до статичной цели. Также были выявлены недостатки прототипа, в частности несовершенство оптической системы и высокий уровень электрических шумов, наводимых на сигнальную линию на плате. Исправление этих недостатков при разработке следующего варианта устройства позволит увеличить максимальную дальность и уменьшить погрешность измерения расстояния.

Список публикаций:

- [1] Rasshofer R.H., Spies M., Spies H. // *Adv. Radio Sci.* 2011. №9. С.52
- [2] Royol S., Ballesta M. // *Appl. Sci.* 2019. 9(19). 4093. С.9
- [3] Royol S., Ballesta M. // *Appl. Sci.* 2019. 9(19). 4093. С.3

## Люминесцентные свойства фосфатов, легированных редкоземельными ионами Трофимова Елена Сергеевна

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,

НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобелыцина МГУ

Пустоваров Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.

[jabestylemna@gmail.com](mailto:jabestylemna@gmail.com)

Поиск новых материалов для быстрых сцинтилляторов привлекает всё больше внимания в связи с растущей потребностью в более эффективных сцинтилляционных детекторах ионизирующего излучения в различных областях применения, например, в медицинском оборудовании. В частности, в позитрон-эмиссионных томографах критически важной является такая характеристика как быстрое время затухания люминесценции.

Сцинтилляторы на основе материалов, легированных редкоземельными ионами (РЗИ), демонстрируют время затухания эмиссии порядка десятков наносекунд. Среди них особо выделяются материалы, активированные ионами  $\text{Ce}^{3+}$ , а также  $\text{Pr}^{3+}$ . Последний характеризуется временами затухания люминесценции в два-три раза короче, чем в ионах  $\text{Ce}^{3+}$ , введённых в такой же материал.

Среди материалов, удовлетворяющим этим требованиям, особое внимание привлекают фосфаты за счёт своих выдающихся физических и химических свойств. Тем не менее, имеются данные о значительном негативном влиянии дефектов в матрице как на время затухания люминесценции ионов  $\text{Pr}^{3+}$  в материале, так и на состав его спектра излучения. Природа таких дефектов не всегда ясна.

Цель работы – комплексное исследование и анализ спектров люминесценции кристаллов фосфатов, легированных РЗИ, для установления закономерностей переноса энергии от матрицы и дефектов – примесным ионам.

Так, на рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ)  $\text{LiSrPO}_4:\text{Pr}^{3+}$ , со-легированных  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  при возбуждении на длине волны излучения 300 нм. Было показано, что данная энергия возбуждения соответствует внутрицентровому возбуждению дефекта, предположительно являющегося центром окраски. Наблюдается перенос энергии как от центра окраски примесному иону  $\text{Pr}^{3+}$ , так и в обратном направлении. Последнее может влиять как на быструю  $5d-4f$  люминесценцию иона  $\text{Pr}^{3+}$  в материале, так и на более медленные  $4f-4f$  излучательные переходы данного иона, что проявляется в значительном проявлении последних в спектрах люминесценции материала.

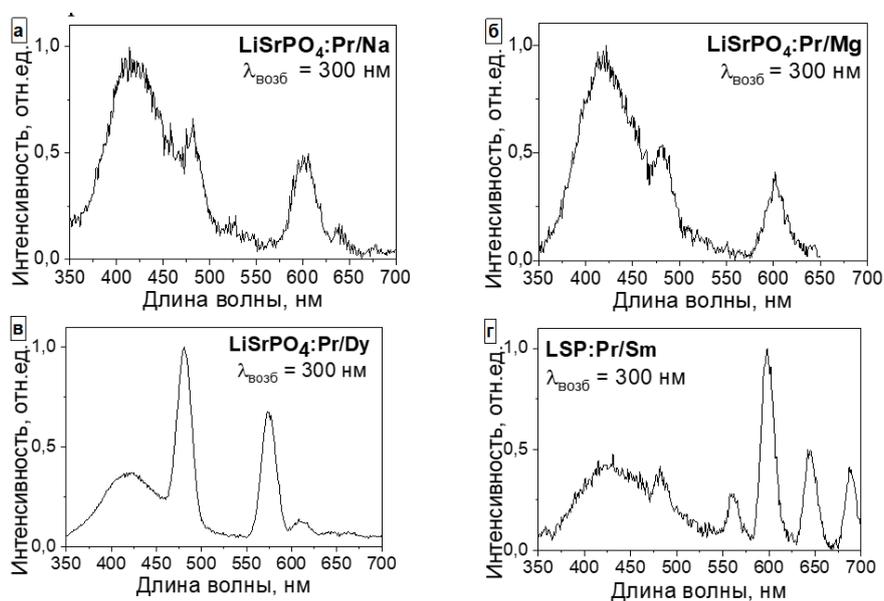


рис.1. Спектры ФЛ  $\text{LSP:Pr}$ ,  $\text{LSP:Pr/Na}$ ,  $\text{LSP:Pr/Mg}$ ,  $\text{LSP:Pr/Dy}$ ,  $\text{LSP:Pr/Sm}$ ,  $\lambda_{\text{возб}} = 300 \text{ нм}$ ,  $T = 5 \text{ K}$

Список публикаций:

- [1] Ivanovskikh K. V et al. // *J. Lumin.* 2021. Vol. 230. P. 117749.
- [2] Pustovarov V.A. et al. // *Radiat. Meas.* 2019. Vol. 123. P. 39–43
- [3] Trofimova E. et al. // *J. Lumin.* 2021. Vol. 240. P. 118455.

## 9 - Физическая химия, химическая физика

Иришин Андрей Геннадьевич, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Экспериментальное исследование скорости термомиграции включений водного раствора KBr в кристалле KBr в стационарных тепловых условиях**  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [andrej.irishin@yandex.ru](mailto:andrej.irishin@yandex.ru) стр. 69

Константинова Мария Георгиевна, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Особенности массопереноса и эволюции форм сечений жидких цилиндрических включений в кристалле после выключения градиента температуры**  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [mkonstantinova0305@gmail.com](mailto:mkonstantinova0305@gmail.com) стр. 70

Лебедев Михаил Сергеевич, н.с.  
Новосибирск, Институт неорганической химии СО РАН, лаб. функциональных пленок и покрытий  
**Синтез тонких плёнок методом атомно-слоевого осаждения для приборов микро- и нанoeлектроники**  
e-mail: [lebedev@niic.nsc.ru](mailto:lebedev@niic.nsc.ru) стр. 72

Минакова Екатерина Николаевна, 6 курс  
Волгоград, Волгоградский государственный университет, Институт математики и информационных технологий  
**Оценка эффективности разделения зарядов в фотовозбужденных диодах**  
Михайлова Валентина Александровна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [minakova.kate@yandex.ru](mailto:minakova.kate@yandex.ru) стр. 73

Панова Анастасия Владимировна, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Микроструктура и устойчивость органических антикоррозионных пленок**  
Шпанько Светлана Павловна, к.х.н.  
e-mail: [nastyashaaprinskaya@mail.ru](mailto:nastyashaaprinskaya@mail.ru) стр. 74

Поздеев Вячеслав Алексеевич, 4 курс  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, Удмуртский ФИЦ, Институт математики и информационных технологий  
**Полимерные плёнки на железных подложках, полученные в плазме паров адамантана**  
Шаков Анатолий Анатольевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [pozdeev99va@gmail.com](mailto:pozdeev99va@gmail.com) стр. 76

Сабурова Валерия Сергеевна, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Физико-химические свойства органических пленок в кислых ингибированных средах**  
Шпанько Светлана Павловна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [lera.saburova.18@mail.ru](mailto:lera.saburova.18@mail.ru) стр. 76

Самойлова Мария Алексеевна, аспирант 4 года обучения  
Екатеринбург, Институт металлургии УрО РАН, Институт металлургии УрО РАН  
**Вязкость расплавов  $XMe_2O-(100-X)B_2O_3$  (Me= Li, Na, K)**  
Хохряков Александр Александрович, д.х.н.  
e-mail: [mari.makarenko.1993@mail.ru](mailto:mari.makarenko.1993@mail.ru) стр. 78

Терехин Кирилл Александрович, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный Федеральнй Университет, Физический  
**Влияние колебаний температуры на термомиграцию включений водного раствора KBr в кристалле KBr**  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [kterehin@svedu.ru](mailto:kterehin@svedu.ru) стр. 79

Убович Милош, аспирант 2 года обучения

Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, физический

**Влияние добавления  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  на молекулярную подвижность в нитрате этиламмония по данным молекулярно-динамического моделирования**

Чижик Владимир Иванович, д.ф.-м.н.

e-mail: [ubovich.milosh@yandex.ru](mailto:ubovich.milosh@yandex.ru)      стр. 80

# Экспериментальное исследование скорости термомиграции включений водного раствора KBr в кристалле KBr в стационарных тепловых условиях

Иришин Андрей Геннадьевич  
Южный федеральный университет  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
[andrei.irishin@yandex.ru](mailto:andrei.irishin@yandex.ru)

Термомиграция (миграция жидких включений в кристалле под действием градиента температуры) представляет интерес как метод создания в полупроводниковом кристалле в течение сравнительно короткого промежутка времени локально легированных областей. Кроме того, это явление может использоваться для изучения механизма кристаллизации и растворения, для определения коэффициента диффузии компонентов жидкого включения, кинетических коэффициентов, анизотропии межфазной энергии и ряда других величин.

Одним из основных параметров, характеризующих термомиграцию, является скорость перемещения включений при заданной средней температуре и градиенте температуры. С одной стороны, важно знать из теории этого явления, как зависит скорость включений от различных факторов, а, с другой стороны, необходимо уметь ее определять из эксперимента. Проведение экспериментов по термомиграции в прозрачных кристаллах позволяет исследовать особенности этого процесса в режиме реального времени и одновременно для большого количества включений разного размера при атмосферном давлении и температурах, близких к комнатным.

Цель настоящего исследования заключалась в том, чтобы организовать автоматизированную видеосъемку процесса термомиграции в прозрачных кристаллах (на примере кристалла KBr), обработать полученную видеoinформацию, определить скорость движения включений разного размера и попытаться интерпретировать эти данные на основе ранее разработанных и современных моделей термомиграции.

Эксперименты были проведены при трех значениях градиента температуры ( $G$ ) в кристалле: 21, 14 и 9 К/см. Первое значение  $G$  приблизительно соответствовало условиям эксперимента по термомиграции, описанного в [1] (но для системы KCl-H<sub>2</sub>O), а два другие – ниже этого значения – для выявления условий, при которых возможно прекращение миграции жидких включений в кристалле из-за затрудненности межфазных процессов.

Результат термомиграции при  $G = 14$  К/см представлен на *рис. 1а* в виде двух фотографий, сделанных с помощью цифрового микроскопа в разные моменты времени и наложенных друг на друга. По таким совмещенным фотографиям осуществлялся отбор нескольких включений разных размеров и проводился расчет скорости их движения по пройденному пути ( $\Delta X$ ) за известный интервал времени ( $\Delta t = 7200$  с для включений на *рис. 1а*).

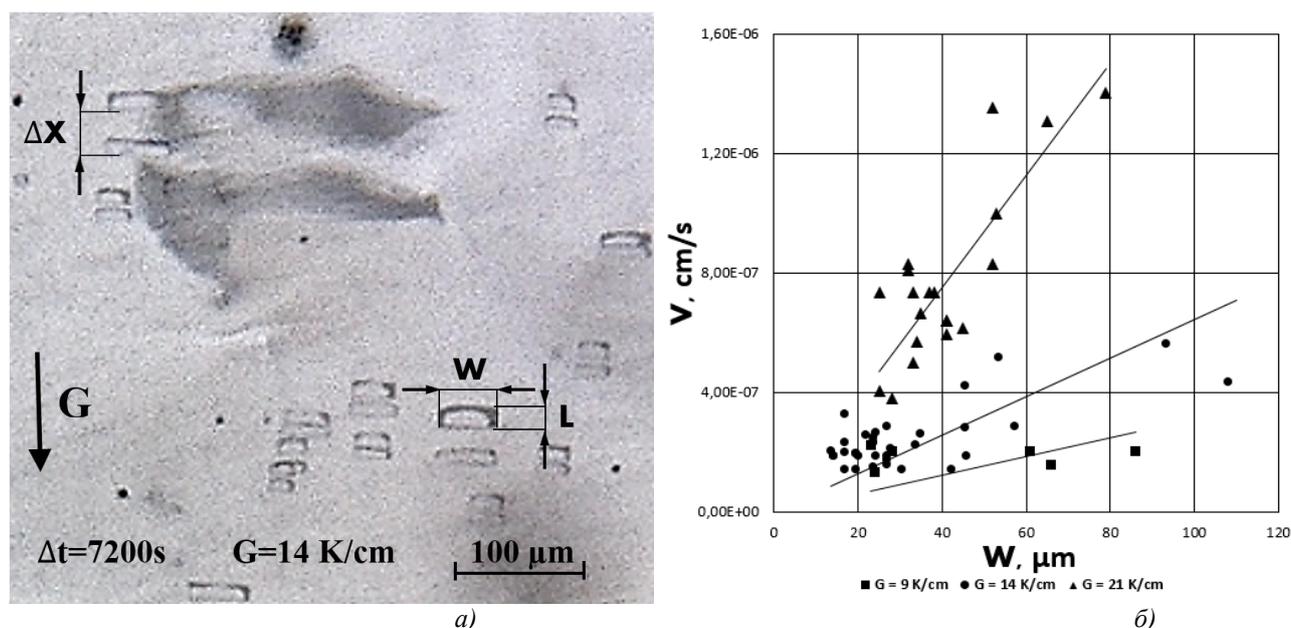


рис. 1 Экспериментально наблюдаемые формы включений состава KBr-H<sub>2</sub>O, мигрирующих в кристалле KBr под действием градиента температуры  $G = 14$  К/см в течение  $\Delta t = 7200$  с (а) и зависимость скорости ( $V$ ) миграции включений от их ширины ( $W$ ) при различных значениях  $G$  (б)

По полученным данным обработки экспериментальных результатов были построены зависимости скорости ( $V$ ) включений от их ширины ( $W$ ) (рис. 1б), как это было выполнено в работе [1]. Авторы [1] отмечали наличие зависимости скорости включений от их ширины и заметный разброс скоростей включений близких размеров. Аналогичная зависимость наблюдается и в проведенных экспериментах: скорость включений возрастает с увеличением их ширины. Можно предположить, что такая зависимость обусловлена увеличением градиента температуры в жидкой фазе для включений большей ширины, поскольку теплопроводности водного раствора бромиды калия примерно на порядок меньше теплопроводности кристалла КВг. Разброс скоростей миграции включений одинаковых размеров, как отмечали авторы [1], может быть обусловлен различной концентрацией дислокаций, которые встречают включения при своем движении в кристалле.

Из анализа полученных данных следует, что скорость включений возрастает с увеличением градиента температуры; включения с большей площадью сечения заметно сплюснены в направлении движения, причем их толщина ( $L$ ) оказывается примерно одинаковой – около 10–15 мкм независимо от их ширины. Эти наблюдения согласуются с выводами теоретических исследований [2, 3], что дает основания для возможности применения таких теорий для интерпретации полученных экспериментальных результатов.

Список публикаций:

[1] Anthony T.R., Cline H.E. // *J. Appl. Phys.* 1971. Т. 42. С. 3380.

[2] Гармашов С.И. // *ФТТ.* 2019. Т.61(12). С. 2303.

[3] Garmashov S.I. // *J. Cryst. Gr.* 2021. V. 574. P. 126312.

## **Особенности массопереноса и эволюции форм сечений жидких цилиндрических включений в кристалле после выключения градиента температуры**

*Константинова Мария Георгиевна*  
*Южный федеральный университет*  
*Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.*  
*[mkonstantinova0305@gmail.com](mailto:mkonstantinova0305@gmail.com)*

Исследование кинетики кристаллизации (растворения), определение кинетических коэффициентов, характеризующих межфазные процессы, а также поиск новых методов для таких исследований продолжает оставаться актуальной задачей физики роста кристаллов. Одним из способов изучения процессов кристаллизации (растворения) является миграция жидких включений в кристалле под действием градиента температуры или, кратко, термомиграция [1-6].

Из экспериментов по термомиграции известно, что форма жидких включений во время подачи градиента температуры меняется, становится отличной от равновесной [3-5]. Но после выключения градиента температуры, как это следует, например, из проведенных экспериментов с включениями  $H_2O$ -КВг в кристалле КВг, она не возвращается к равновесной. Причина такого поведения может заключаться в зародышевом механизме процессов кристаллизации и растворения, при котором требуются критические пересыщения (недосыщения).

Для проверки этой гипотезы и оценки возможности определения некоторых параметров рассматриваемого процесса был смоделирован одномерный массоперенос в плоской жидкой прослойке, заключенной между двумя кристаллическими пластинами, при включении и выключении градиента температуры. Для этого была написана программа для численного решения нестационарного уравнения диффузии интегро-интерполяционным методом сеток с нелинейными граничными условиями, соответствующими двум механизмам кристаллизации: зародышевому и дислокационному. Как известно [2], в случае дислокационного механизма скорость  $V$  движения межфазной границы описывается квадратичной зависимостью от действующего пересыщения  $\Delta C$  ( $V \sim |\Delta C|^2$ ), а в случае зародышевого механизма – экспоненциальной ( $V \sim \exp\left(-\frac{\mu_c(d)}{|\Delta C|}\right)$ ),  $\mu_{c(d)}$  – кинетический коэффициент, определяющий степень затрудненности процессов кристаллизации (растворения).

Как показало моделирование, при включенном градиенте температуры происходит достаточно быстрое установление концентраций раствора в прослойке жидкой фазы как при зародышевом механизме, так и при дислокационном (рис. 1а). После выключения градиента температуры при дислокационном механизме пересыщения спадают до нулевых значений за сравнительно короткое время (порядка единиц минут), в то время как при зародышевом механизме наблюдаются остаточные пересыщения (недосыщения), которые, как было установлено в ходе математических расчетов, спадают до нуля только по истечении нескольких десятков

лет (рис. 1б, в). Следует отметить, что величины этих остаточных пересыщений (недосыщений) не зависят от толщин прослоек, а определяется лишь степенью затрудненности межфазного процесса.

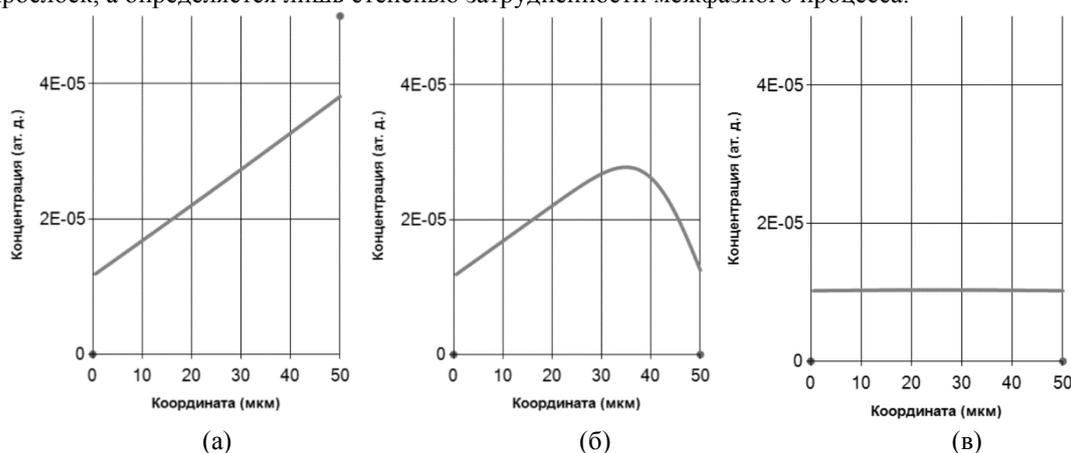


рис. 1 Распределение равновесных (точки) и фактических (линии) концентраций раствора вещества кристалла в плоской жидкой прослойке толщиной 50 мкм при включенном градиенте температуры (а), спустя некоторое время после его выключения ( $t = 0,1$  с (б),  $t \gg 0,25$  с (в)) в случае зародышевого механизма межфазных процессов (отсчет представленных концентраций ведется от равновесной концентрации  $C(T(0))$  на левой границе ( $x = 0$ ) прослойки с температурой  $T(0)$ )

Для проверки существования эффекта остаточного пересыщения после выключения градиента температуры в двумерном случае, т.е. в случае цилиндрических включений, было проведено компьютерное моделирование двумерного массопереноса при включении и выключении градиента температуры с помощью ранее разработанной моделирующей программы [6].

В случае цилиндрических включений величина остаточного пересыщения (недосыщения), как и в случае плоских прослоек, не зависит от размеров включения, что позволяет оценить эту величину по остаточной форме сечения цилиндрического включения. В докладе демонстрируется, как можно использовать этот эффект для определения затрудненности межфазных процессов, в частности, при миграции включений  $H_2O-KVr$  в кристалле  $KVr$ .

Список публикаций:

- [1] Леммлейн Г. Г. Перемещение жидкого включения в кристалле в направлении к источнику тепла. // Докл. АН СССР. 1952. Т. 85. № 2. С. 325–328.
- [2] Лозовский В. Н. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых. – М.: Металлургия, 1987. 232 с.
- [3] Cline H.E. Nonequilibrium morphology of liquid inclusions migrating in solids. // J. Appl. Phys. 1977.V.48, N.12. P. 5096–5104.
- [4] Гармашов С.И. К методике исследования межфазной кинетики и анизотропии удельной межфазной энергии из экспериментов по миграции жидких цилиндрических включений в кристалле в стационарных тепловых условиях. Кристаллография. 2018. Т. 63, №5 С.827-831.
- [5] Garmashov S.I. A model of shapes of liquid cylindrical inclusions migrating through a non-uniformly heated crystal: Fundamentals and applications for studying crystallization and dissolution // J. Cryst. Growth. 2021. V.574. 126312.
- [6] Гармашов С.И., Гершанов В.Ю. Электронный информационный образовательный ресурс: Программное обеспечение для расчета скорости и формы сечения жидких цилиндрических включений, мигрирующих перпендикулярно плотноупакованным плоскостям неоднородно нагретого кристалла в стационарных тепловых условиях // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», № 5, 2011. С. 17.

## Синтез тонких плёнок методом атомно-слоевого осаждения для приборов микро- и нанoeлектроники

*Лебедев Михаил Сергеевич*

*Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН*

*[lebedev@niic.nsc.ru](mailto:lebedev@niic.nsc.ru)*

Метод атомно-слоевого осаждения (АСО, англ. - atomic layer deposition, ALD), имеющий в наше время огромное прикладное значение, был предложен в 60-х годах XX в. группой ленинградских ученых (проф. В.Б. Алесковский и проф. С.И. Кольцов) под названием «молекулярное наслаивание» [1]. В докладе обсуждаются важнейшие характеристики АСО-процессов: реакционный цикл, полуреакция, прирост толщины за 1 реакционный цикл (РЗЦ), окно «АСО», нежелательные CVD-компоненты, нуклеационная задержка. представлены физико-химические аспекты и основные практические достижения, связанные с использованием метода АСО в области создания гомогенных и многослойных тонкопленочных покрытий функционального назначения для микро- и нанoeлектроники.

Свою «основную» гипотезу проф. В.Б. Алесковский сформулировал при работе над катализаторами, на основе которой и был его школой развит метод молекулярного наслаивания, как путь контролируемого синтеза твердых веществ постоянного состава. Свойство самоограничения, которым обладают некоторые химические реакции между поверхностными функциональными группами и подводимыми газообразными реагентами, позволяет многократно проводить такие реакции и контролировать процесс осаждения на молекулярном уровне. С учетом того, что в результате одного реакционного цикла образуется лишь субмонослой твердой фазы, возникает целый набор возможностей управления химическим составом многокомпонентных слоев высокой степени гомогенности и прецизионно задавать толщину слоев. Метод продолжил свое развитие в Ленинграде, но позднее этот метод был запатентован группой финских ученых под названием «атомно-слоевая эпитаксия» и наиболее активно стал развиваться во всем мире, начиная с середины 90-х годов XX века для ряда технологических задач, в первую очередь, микроэлектроники, а также оптики и катализа. Для таких задач как получение конформных покрытий (в т.ч. многокомпонентных), с высокой степенью контроля толщины вплоть до долей монослоя, на поверхностях большой площади и с развитым рельефом, метод АСО стал уникальным инструментом ввиду практически полного отсутствия альтернатив.

Фактически первым основным вызовом методу АСО в микроэлектронике стала задача внедрения свертонких слоев оксида гафния  $\text{HfO}_2$  в качестве замены оксида кремния, традиционного для микроэлектроники подзатворного диэлектрика. Увеличение  $\epsilon$  подзатворного диэлектрика ведёт к увеличению ёмкости МДП-структуры при сохранении размеров, что, например, увеличивает ток насыщения полевого транзистора. Использование  $\text{HfO}_2$  позволило продолжить масштабирование устройств микроэлектроники, таких как микропроцессоры.

В дальнейшем стали рассматриваться новые возможности по улучшению свойств  $\text{HfO}_2$ . Такие как стабилизация аморфной (отсутствие межзеренных границ, способных увеличивать токи утечки). Например,  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  явились перспективными аморфизирующими примесями, позволяющими избежать нежелательной кристаллизации  $\text{HfO}_2$ . Добавка  $\text{TiO}_2$  ( $k_{\text{TiO}_2}=40-80$ ) повышает диэлектрическую проницаемость [1]. Легирование  $\text{HfO}_2$  другими оксидами позволило в широком диапазоне варьировать функциональные свойства в зависимости от конкретных применений. Сообщалось об улучшении характеристик переключения из низкоомного в высокоомное состояние и обратно для систем  $\text{Hf}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_2$  и  $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  (ReRAM). Большой интерес наблюдается к метастабильной кубической модификации  $\text{HfO}_2$ , обладающей более высоким значением диэлектрической проницаемости по сравнению с термодинамически стабильной при актуальных для технологических процессов температурой и, поэтому доминирующей, фазой моноклинного  $\text{HfO}_2$ . Было неоднократно показано, что легирование  $\text{HfO}_2$  оксидами редкоземельных металлов позволяет стабилизировать кубическую фазу при сравнительно низких температурах. А после обнаружения сегнетоэлектрического эффекта в оксиде гафния, который связывают с возможностью стабилизации центрально-несимметричной орторомбической фазы  $\text{Pbc}2_1$ , была показана перспективность широкого круга легирующих оксидов следующих элементов: Zr, Si, Al, Y, La, Gd, Sr для создания устройств сегнетоэлектрической (FeRAM) – памяти.

Широкий круг возникших задач требует развития методик АСО новых материалов и получения данных о структурно-морфологических характеристиках и свойствах в зависимости от условий получения. В данном сообщении с некоторыми примерами из собственной практики автором представлены методики АСО пленок и результаты исследования тонких пленок простых оксидов титана  $\text{TiO}_2$ , гафния  $\text{HfO}_2$ , скандия  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  и самария  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ , а также полного набора двухкомпонентных оксидов на их основе и некоторых многослойных структур.

Работа выполняется при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-53-52009

Список публикаций:

[1] С.И. Кольцов *Журн. прикл. химии*. Т. 42. (1969) С. 1023-1028.

## Оценка эффективности разделения зарядов в фотовозбужденных диодах

Минакова Екатерина Николаевна

Волгоградский государственный университет

Михайлова Валентина Александровна, д.ф.-м.н.

[minakova.kate@yandex.ru](mailto:minakova.kate@yandex.ru)

В рамках многоканальной стохастической модели [1] проводится исследование кинетики процессов разделения и рекомбинации зарядов в донорно-акцепторных диодах в полярных средах. Целью исследования является определение основных физических параметров модели, когда с наибольшей эффективностью формируется состояние с разделенными зарядами, а процесс рекомбинации зарядов проходит с максимально низкой скоростью. Актуальность данного исследования обусловлено тем, что разделение зарядов в качестве элементарного акта присутствует во многих фотохимических и фотофизических процессах, встречающихся в живой природе (дыхание, фотосинтез). Однако этот процесс сопровождается нежелательной рекомбинацией зарядов, что понижает эффективность процессов. Изучение связанных процессов разделения и рекомбинации зарядов является востребованным. Для описания данных процессов в диаде после их фотовозбуждения используется трехуровневое приближение [2], то есть рассматриваются три состояния диады: с разделенными зарядами (CSS), возбужденное состояние ( $S_2$ ) и состояние, в которое происходит рекомбинация зарядов ( $S_1$ ). Предполагается, что фотовозбуждение может происходить как в первое, так и во второе электронное состояние. В первом случае рекомбинация идет в основное состояние, во втором случае – в первое возбужденное состояние диады. Модель учитывает реорганизацию растворителя и возбуждение нескольких внутримолекулярных колебательных мод донорно-акцепторной диады. Все колебательные моды диады рассматриваются как высокочастотные и учитывается их релаксация. На рис. 1 представлены профили свободной энергии Гиббса для рассматриваемых электронных состояний  $S_1$ ,  $S_2$ , CSS вдоль координаты реакции  $Q$  в случае возбуждения одного внутримолекулярного колебания (пунктирные линии). Области электронных переходов на стадии разделения и рекомбинации зарядов отмечены символом ( $\circ$ ). Вертикальными стрелками показаны переходы между колебательными уровнями (колебательная релаксация).

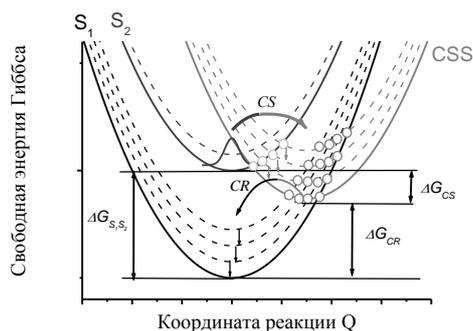


рис. 1. Профили свободной энергии Гиббса для состояний  $S_1$ ,  $S_2$ , CSS вдоль координаты реакции  $Q$ .  $\Delta G_{S_1S_2}$  – энергетическая щель между состояниями  $S_1$  и  $S_2$ ,  $\Delta G_{CR}$  и  $\Delta G_{CS}$  – параметры экзергоничности для стадий рекомбинации и разделения зарядов

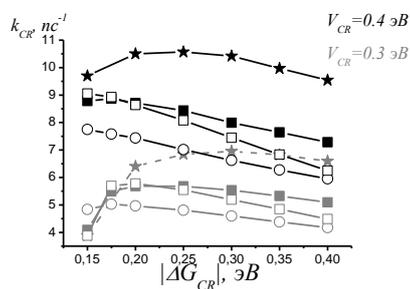


рис. 2. Зависимость константы скорости разделения зарядов  $k_{CR}$  от  $|\Delta G_{CR}|$  в толуоле ( $\star$ ) и тетрагидрофуране ( $\blacksquare, \circ, \square$ ). Расчетные параметры: матричный элемент перехода на стадии рекомбинации зарядов  $V_{CR} = 0.4$  эВ (черные),  $0.3$  эВ (серые),  $\tau_1 = 0.228$  пс ( $\blacksquare$ ),  $0.5$  пс ( $\circ$ ),  $\Delta G_{S_1S_2} = 0.85$  эВ ( $\blacksquare$ ),  $1$  эВ ( $\square$ ).

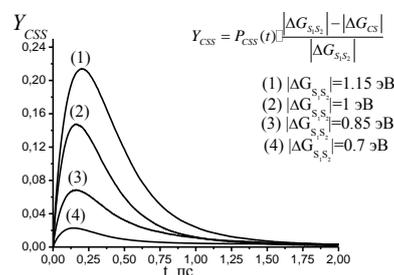


рис. 3. Временная зависимость энергетической эффективности разделения зарядов  $Y_{CSS}$ .  $P_{CSS}$  – населенность состояния с разделенными зарядами. Расчетные параметры:  $\tau_1 = 0.228$  пс,  $\tau_2 = 1.52$  пс, матричный элемент перехода на стадии разделения зарядов  $V_{CS} = 0.03$  эВ, на стадии рекомбинации зарядов  $V_{CR} = 0.03$  эВ,  $\Delta G_{CS} = 0.65$  эВ,  $|\Delta G_{S_1S_2}| = 0.7$  эВ,  $0.85$  эВ,  $1$  эВ,  $1.15$  эВ.

При численном анализе кинетики разделения и рекомбинации зарядов в диадах энергия реорганизации высокочастотных внутримолекулярных мод не варьировалась, а выбиралась фиксированной. Число активных высокочастотных внутримолекулярных мод полагалось равным 5 и их частоты и энергии реорганизации [3] считались одинаковыми на стадиях разделения и рекомбинации зарядов. Динамические свойства растворителя характеризуются автокорреляционной функцией вида:  $X(t) = \sum x_i e^{-t/\tau_i}$  где  $\tau_i$  и  $x_i$  – время и вес  $i$ -ой релаксационной моды,  $t$  – время. В расчетах использовались параметры тетрагидрофурана (быстрый растворитель) и толуола (медленный растворитель) [4].

Результаты численного моделирования кинетики в диадах после их фотовозбуждения позволяют сформулировать следующие тренды: (1) кинетика населенности состояния с разделенными зарядами диады не является экспоненциальной в рамках исследованных параметров модели [5]; (2) в узкой области малых значений  $|\Delta G_{CR}|$  (от 0,15 до 0,2 эВ) возможен набор параметров, когда эффективная константа скорости рекомбинации зарядов  $k_{CR}$  падает (рис. 2). Эта тенденция исчезает при увеличении матричного элемента перехода  $V_{CR}$  и уменьшении времени  $\tau_1$ , соответствующей инерционной компоненте функции релаксации растворителя, и энергетической щели  $|\Delta G_{S1S2}| = |\Delta G_{CR}| + |\Delta G_{CS}|$ ; (3) формирование состояния с разделенными зарядами происходит наиболее энергетически эффективно при увеличении энергетической щели  $|\Delta G_{S1S2}|$  (рис.3) и матричного элемента перехода на стадии разделения зарядов  $V_{CS}$ .

Список публикаций:

- [1] S.V. Feskov, V. A. Mikhailova, A. I. Ivanov // *J. Photochem. Photobiol. C: Photochemistry Reviews*. – 2016. – V. 29. – P. 48-72.  
 [2] V.A. Mikhailova, R. Malykhin, A.I. Ivanov // *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2018, V. 17, P. 607-616.  
 [3] A. Myers Kelly // *J. Phys. Chem. A.*, 1999, V. 103, P. 6891-6903.  
 [4] Maroncelli M., Kumar V. P., Paragyan A. A // *J. Phys. Chem*, 1993, V. 97, P. 13–17.  
 [5] Михайлова В.А., Фунин С.В., Минакова Е.Н. // *Студенческий вестник: научный журнал*. – № 24(74). – М., Изд. «Интернаука», 2019.

## Микроструктура и устойчивость органических антикоррозионных пленок

*Панова Анастасия Владимировна*  
 Южный федеральный университет  
 Шпанько Светлана Павловна, к.х.н.  
[nastya.shaprinskaya@mail.ru](mailto:nastya.shaprinskaya@mail.ru)

Изучено защитное действие, микроструктура и устойчивость органических пленок, полученных на поверхности низколегированной стали в кислых средах в присутствии композиционных ингибиторов на основе органических и неорганических соединений. Установлено, что защитный эффект ингибиторов увеличивается с ростом концентрации неорганической компоненты и времени формирования пленок  $\tau$  [1, 2].

В данной работе в качестве композиционного ингибитора исследовано производное бензимидазола (ПАВ-поверхностно-активное вещество), допированное бромидом калия.

Изучена микроструктура исследуемых органических пленок с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6390LA (JEOL). Установлено, что исследуемые пленки имеют ячеистую, глобулярную структуру, морфология которых зависит от условий их формирования (рис. 1).

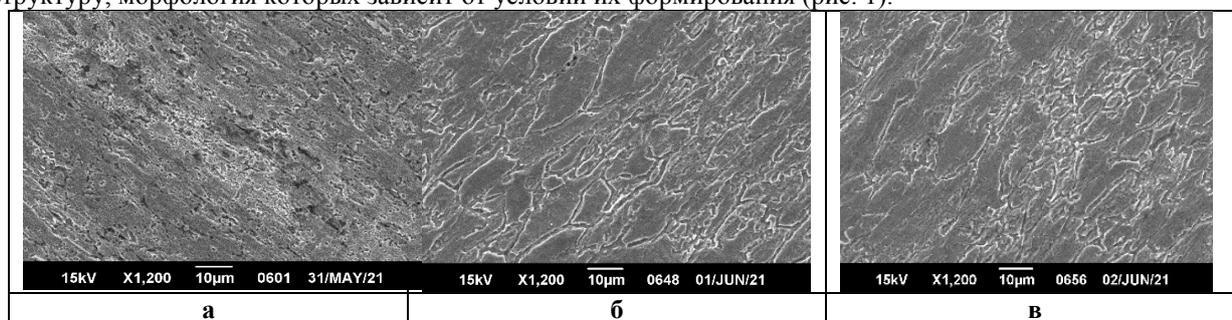


рис.1. Микроструктура поверхности образцов ( $\times 1200$ ), полученных в электролитах состава ПАВ+ KBr:  
 а -  $C_{KBr} = 0,1$  моль/л,  $\tau = 1$  сутки; б -  $C_{KBr} = 0,1$  моль/л,  $\tau = 2$  суток; в -  $C_{KBr} = 0,3$  моль/л,  $\tau = 1$  сутки

Увеличение времени осаждения покрытий (рис.1а, б) способствует формированию пленок с более выраженной ячеистой структурой. Образуются протяженные кристаллические ячейки различных размеров с плоской поверхностью, разделенные границами раздела шириною 0,5-1,5 мкм (рис. 1б).

Увеличение концентрации  $C_{\text{КВг}}$  в составе композиционного ПАВ способствует так же образованию пленок с более рельефной ячеистой структурой, которая однако имеет тенденцию к сглаживанию при дальнейшем увеличении концентрации КВг до 0,3-0,4 моль/л (рис. 1а, в), что связано вероятно с процессом рекристаллизации и образования многослойных покрытий.

Установлено, что исследуемые пленки обладают большой проводимостью, которая для образцов площадью  $1\text{ см}^2$  колеблется в пределах  $0,02 \div 0,2$  см. Возрастание внешнего давления увеличивает проводимость пленок на один-два порядка.

Изучена устойчивость пленок в кислых растворах. Эти исследования особенно важны для изделий, использование которых требует довольно длительного нахождения в неингибированных агрессивных средах. Для изучения устойчивости пленок использовали емкостной метод. Электрохимическую емкость покрытия на ингибированных образцах измеряли через определенные промежутки времени при частоте переменного тока  $f=1\text{ кГц}$  и в зависимости от частоты переменного тока [3] (рис.2).

Об устойчивости пленок в HCl судили по абсолютной величине емкости  $C$ , скорости десорбции молекул ПАВ с поверхности ингибированных образцов  $dC/dt$  и дисперсии емкости с частотой переменного тока  $dC/d\lg f$ . где  $t$ - время кислотной постобработки образцов.

Установлено, что устойчивость органических пленок в кислой среде возрастает при переходе от ПАВ к ПАВ+КВг и с ростом СКВг в композиционном ингибиторе. Об этом свидетельствует уменьшение величин  $C$ ,  $dC/dt$ , (рис. 2а) и  $dC/d\lg f$  (рис. 2б). Чем меньше показатели десорбции, тем больше изолирующие свойства покрытий в данной среде.

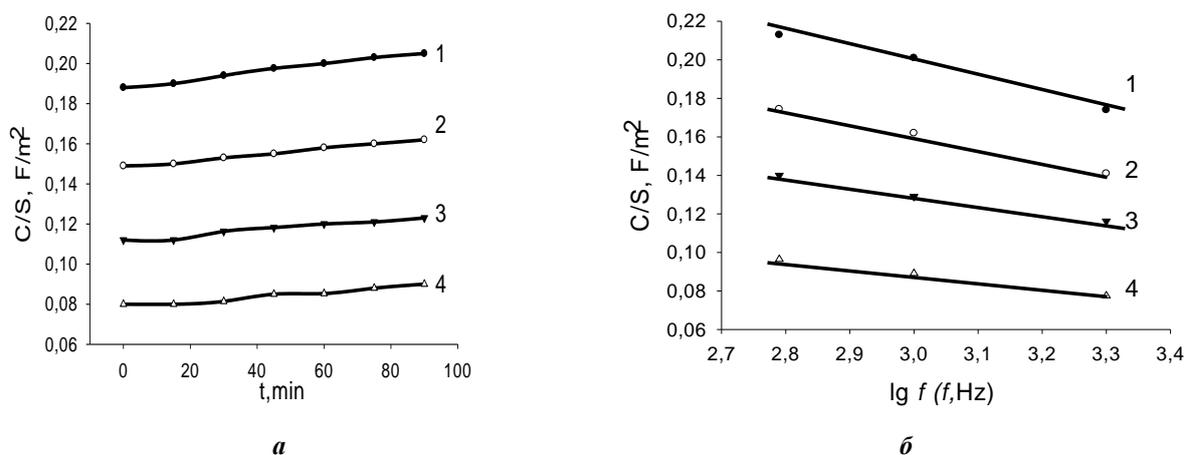


рис.2. Зависимость удельной емкости  $C/S$  на ингибированных электродах от времени их кислотной постобработки  $t$  (а) и от частоты переменного тока  $f$  (б) (среда - 1М HCl) для ингибиторов разного состава при формировании пленки: 1 – ПАВ и ПАВ+ КВг при  $C_{\text{КВг}}$ , моль/л: 2 – 0.025; 3 – 0.05; 4 – 0.1

Таким образом, экспериментально показано, что наибольшими защитными свойствами и устойчивостью к кислотной постобработке обладают органические пленки с более рельефной ячеистой структурой, обладающие небольшими внутренними напряжениями и высокой электропроводностью.

Список публикаций:

[1] Bogatin A.S., Sidorenko E.N., Shpanko S.P., Kovrigina S.A., Abdulvakhidov K.G., Nosatshev I.O. // Springer Proceedings in Physics 2021 Vol.225 P. 203-213.

[2] Shpanko S.P., Sidorenko E.N., Kuznetsova L.E., Sosin E.A. // Springer Proceedings in Physics 2019 Vol.224 P. 123-130. <https://www.springer.com/in/book/9783030198930>

[3] Rosenfeld I. L., Rubinstein F. I., Zhigalova K. A./ Protection of metals from corrosion by paint and varnish coatings M.: Chemistry. 1987. pp. 1-224

## Полимерные плёнки на железных подложках, полученные в плазме паров адамантана

*Поздеев Вячеслав Алексеевич*<sup>1,2</sup>

*Шаков Анатолий Анатольевич*<sup>2</sup>, *Шушков Андрей Александрович*<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> *Удмуртский государственный университет*

<sup>2</sup> *Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН*

<sup>3</sup> *Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова*

*Шаков Анатолий Анатольевич, к.ф.-м.н.*

[pozdeev99va@gmail.com](mailto:pozdeev99va@gmail.com)

Плёнки, полученные методом полимеризации в плазме, имеют малую толщину (меньше или порядка микрометра), хорошую сплошность, высокую адгезию к подложке; они термостабильны и плохо растворяются в органических растворителях. В качестве мономера в данной работе был выбран адамантан, атомы углерода в его молекуле расположены аналогично атомам в решетке алмаза (точечная группа  $T_d$ ). Полимерные покрытия на основе адамантана и его производных могли бы наследовать некоторые свойства алмаза, такие как твёрдость, прозрачность и другие. Как правило, предельные классические полимеры адамантана, действительно, обладают рядом ценных характеристик: высокая термостабильность, оптическая прозрачность и устойчивость к окислению, гидролизу, воздействию света и растворителей [1]. Сочетание свойств классических полимеров адамантана с преимуществами, которые даёт плазменная полимеризация, делает синтез и изучение свойств полимеров, полученных из плазмы паров адамантана, перспективным направлением.

В данной работе методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), атомно-силовой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, наноиндентирования, измерения краевого угла смачивания [2] были исследованы тонкие полимерные плёнки, полученные на железных подложках из плазмы паров адамантана. Показано, что полученная плёнка имеет столбчатую структуру, диаметр столбиков – 50 – 100 нм. Поверхностная энергия полученного полимера составляет величину 40,8 мДж/м<sup>2</sup>, что близко к поверхностной энергии малополярных органических полимеров. При помощи РФЭС установлено, что анализируемый слой полимера содержит 75 ат. % нефункционального углерода, а также 9 ат. % углерода и 14 ат. % кислорода в составе пероксидов [3], которые образуются при взаимодействии свободных радикалов в полимере с кислородом воздуха. Методом наноиндентирования установлено, что синтезированные плёнки имеют толщину около 1–2 мкм. Также были измерены параметры физико-механических свойств синтезированной плёнки: твердость; приведенный модуль упругости; параметр упругого восстановления; податливость; работа, затрачиваемая на упругую деформацию и работа, затрачиваемая на пластическую деформацию. Выявлено, что плёнки обладают твёрдостью  $H = (62 \pm 18)$  МПа, сравнимой с твёрдостью полиэтилена низкого давления, и приведенным модулем упругости  $E_r = (310 \pm 90)$  МПа, близким к приведенному модулю упругости полиэтилена высокого давления.

Список публикаций:

[1] Багрий Е. И. // *Адамантаны: Получение, свойства, применение*. М.: Наука, 1989. С. 247

[2] Ляхович А. М., Шаков А. А., Лялина Н. В. Влияние влажности среды на значения краевых углов смачивания поверхностей с различной гидрофильностью // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2010. Т.46, № 5. С. 461 - 466.

[3] Friedrich J. *The Plasma Chemistry of Polymer Surfaces: Advanced Techniques for Surface Design*. Weinheim: Wiley. 2012. Chapter 2. *Interaction between Plasma and Polymers*, pp. 15-25.

## Физико-химические свойства органических пленок в кислых ингибированных средах

*Сабурова Валерия Сергеевна*

*Южный федеральный университет*

*Шпанько Светлана Павловна, к.х.н.*

[saburova@sfedu.ru](mailto:saburova@sfedu.ru)

В последние годы возрос интерес к изучению морфологии и физико-химических свойств адсорбционных антикоррозионных пленок [1]. Установлено, что защитные свойства пленок возрастают при использовании композиционных ингибиторов и времени формирования адсорбционного слоя.

В работе изучена микроструктура поверхности и механизм защитного действия адсорбционных пленок, полученных на поверхности стали в соляной кислоте в присутствии производного имидазобензимидазола (ИБИ) и его смесей с бромидом калия.

Сканы микроструктуры органических пленок получены с помощью сканирующего электронного микроскопа модели JSM 6390LA (JEOL) с полностью автоматизированной системой электронной

высококачественной оптики. Согласно полученному эксперименту (рис.1), исследуемые образцы полностью покрыты защитными органическими пленками. Визуально наблюдается ячеистая структура пленок, морфология которых в значительной степени зависит от условий их получения.

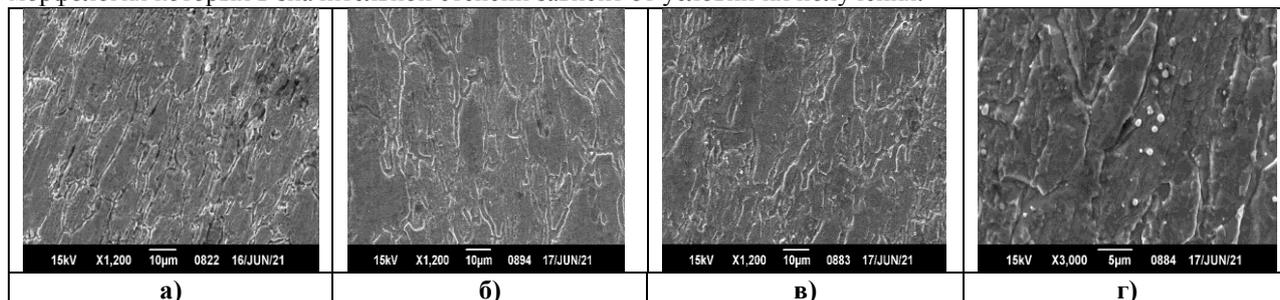


рис.1. Микроструктура поверхности образцов ( $\times 1200$ ), полученных в электролитах состава ИБИ+KBr: а -  $C_{KBr} = 0,1$  моль/л,  $\tau = 1$  сутки; б -  $C_{KBr} = 0,3$  моль/л,  $\tau = 1$  суток; в -  $C_{KBr} = 0,1$  моль/л,  $\tau = 2$  сутки г -  $C_{KBr} = 0,15$  моль/л,  $\tau = 2$  сутки ( $\times 3000$ )

При небольших концентрациях KBr ( $C_{KBr}$ ) и времени формирования пленок  $\tau$  (рис.1 а) осаждаются тонкие, сильно изрезанные границами покрытия, имеющие большое количество мелких ячеек неправильной формы. Скорей всего образование таких покрытий обусловлено наличием различного рода напряжений, возникающих в пленках в процессе адсорбции молекул ИБИ на поверхности стали при образовании тонкого органического слоя.

Увеличение  $C_{KBr}$  и  $\tau$  (рис. 1 б, в) способствует осаждению пленок с более упорядоченной ячеистой структурой, что может быть связано с релаксацией в пленках внутренних напряжений в результате образования более объемных полимолекулярных органических слоев.

Ранее с помощью атомно-силового сканирующего микроскопа были исследованы аналогичные защитные пленки и показано, что образующиеся в процессе адсорбции органической добавки ячейки имеют глобулярную структуру [1]. На увеличенном участке одной из ячеек исследуемых нами пленок видны вершины отдельных глобул округлой формы (рис. 1 г). Эти данные подтверждают глобулярный характер полученных пленок.

Исследуемые ингибиторы являются соединениями адсорбционного типа. Об этом свидетельствует понижение емкости двойного электрического слоя (ДЭС) в присутствии ингибиторов по сравнению с фоном. На основании результатов гравиметрии и импедансометрии рассчитаны степень заполнения поверхности стали молекулами органического соединения  $\theta$ , вклады в механизм защитного действия ингибиторов эффектов блокировки  $K_0$  и изменения строения ДЭС  $K_{\psi'}$  (рис.2).

Установлен механизм защитного действия добавок, обуславливающий рост степени защиты стали в соляной кислоте с увеличением концентрации KBr в композиционном ингибиторе [2]. Увеличение эффекта экранирования поверхности (рис. 2 а) способствует росту блокировочной составляющей  $K_0$  (рис. 2 б, кривая 3). А изменение строения ДЭС и адсорбционного  $\psi'$ - потенциала вызывает увеличению энергетического эффекта  $K_{\psi'}$  (рис. 2 б, кривая 2). Экспериментально показано, что изменение строения двойного слоя в большей степени влияет на защитные свойства добавок, чем экранирующий фактор. Об этом свидетельствует сравнение абсолютных величин частных и суммарного коэффициентов торможения коррозии стали в соляной кислоте (рис. 2 б).

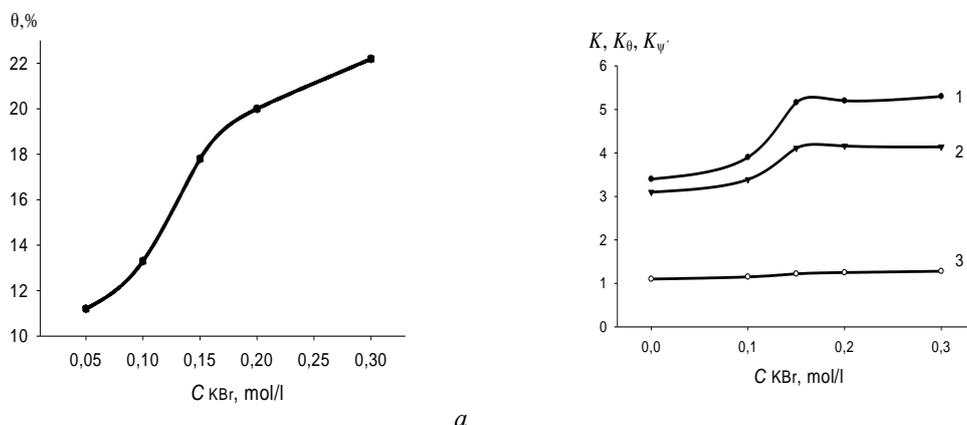


рис.2. Зависимость от  $C_{KBr}$  в смеси ингибиторе степени экранирования поверхности стали молекулами ИБИ  $\theta$  (а) и коэффициентов торможения коррозии (б): 1 – суммарного  $K$ ; 2 – энергетического –  $K_{\psi'}$ ; 3 – блокировочного –  $K_0$

Таким образом, увеличение  $C_{KB}$  и  $\tau$  способствует росту степени защиты за счет блокировочно и энергетического факторов, способствующих образованию более толстых и менее напряженных пленок с укрупненными ячейками и уменьшенным числом измельченных границ.

Список публикаций:

[1] Sidorenko E.N., Shpanko S.P., Bunin M.A., Debelova T.I.// *Collective monograph. Proceedings of the 2019 International Conference on «Physics, mechanics of New Materials and Their Applications»*, 2019/Hanoi, Vietnam., Nova Science Publishers. New York. 2020. P.129-136.

[2] Решетников С.М. *Ингибиторы кислотной коррозии металлов. Ленинград. Химия, 1988. сс. 1-142.*

## Вязкость расплавов $XMe_2O-(100-X)B_2O_3$ (Me= Li, Na, K)

Самойлова Мария Алексеевна

Пайвин Алексей Сергеевич, Рябов Валерий Васильевич

Институт металлургии УрО РАН

Хохряков Александр Александрович, д.х.н.

[mari.makarenko.1993@mail.ru](mailto:mari.makarenko.1993@mail.ru)

Щелочноборатные расплавы получают все более широкое применение в промышленности в качестве покровных флюсов в металлургических технологиях [1]. Важной физико-химической характеристикой является вязкость щелочноборатных систем в расплавленном состоянии при высоких температурах. Вязкость щелочноборатных расплавов измерена в интервале температур 918–1655 К с помощью вибрационного вискозиметра, работающего в режиме вынужденных колебаний [2]. Содержание оксида щелочного металла варьировалось от 0 до 15 мол. %

В ходе работы получены концентрационные зависимости вязкостей литий-, натрий- и калийсодержащих систем (рис. 1). Зависимости величины вязкости от содержания щелочного оксида (мол.%) объяснены с точки зрения образования надструктурных единиц в сетке расплава. Установлено влияние щелочных ионов на изменение координационного числа атомов бора .

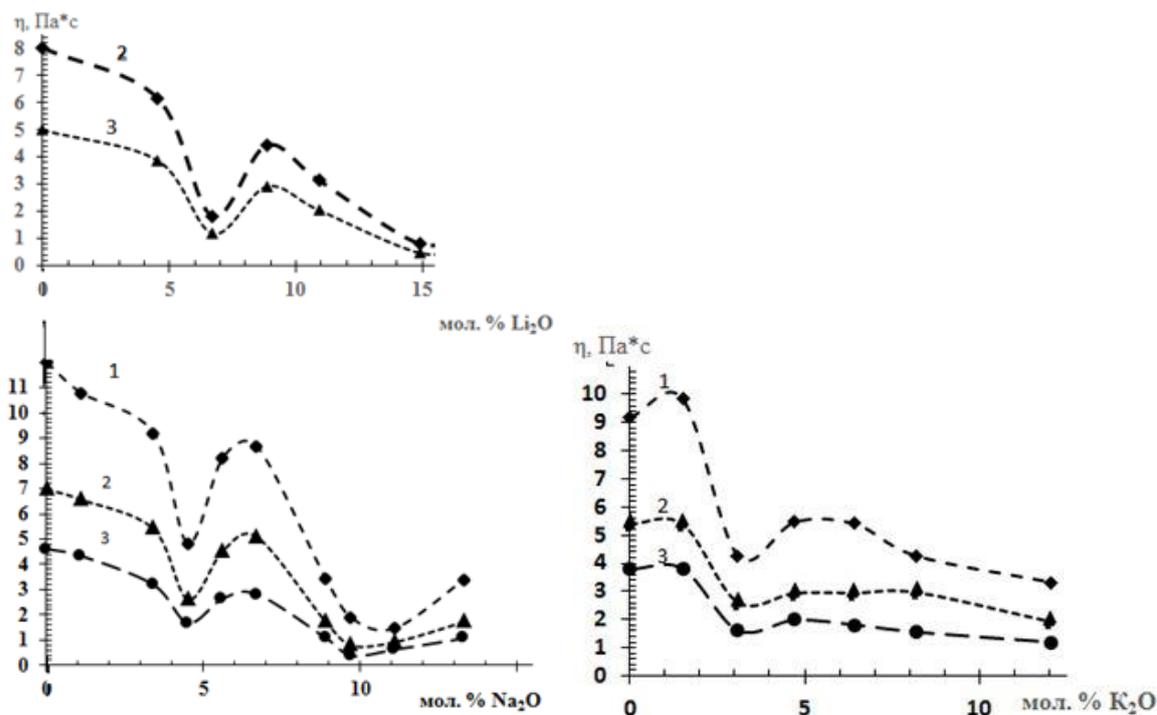


рис1 – Зависимость вязкости  $\eta$  (Па\*с) расплавов  $xMe_2O(100-x)B_2O_3$  от состава (Me=Li, Na, K) при температурах: 1 – 1173 К, 2 -1273 К, 3 – 1373 К

Наблюдаемые отклонения от аддитивности связаны с разным соотношением структурных группировок, формируемых в борокислородной сетке расплава по мере последовательного увеличения концентрации щелочного оксида. [1,2]

Список публикаций:

[1] Кель И.Н., Жучков В.И // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2018. № 40. С. 15-21.

[2] Самойлова М.А., Мельчаков С.Ю., Рябов В.В., Хохлаков А.А // Стекло: наука и практика (GlasSP2021). сборник тезисов Третьей Российской конференции с международным участием. 2021. С. 74-75.

## **Организация нестационарного теплового режима для управления процессом термомиграции включений водного раствора КВг в кристалле КВг**

*Терехин Кирилл Александрович*

*Южный федеральный университет*

*Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.*

*[kterehin@sfedu.ru](mailto:kterehin@sfedu.ru)*

Термомиграция – это процесс миграции жидких включений в кристалле под действием градиента температуры, возникающей благодаря массопереносу атомов кристалла через жидкую фазу от более нагретой границы к менее нагретой. Данное явление находит широкое применение для изготовления полупроводниковых устройств и легирования кристаллов.

Возможности процесса термомиграции могут значительно расширены, если можно было бы сравнительно легко управлять скоростью процесса, геометрией перекристаллизованной области, степенью легирования кристаллов. Как было показано в [1], один из способов организации такого управления термомиграцией включений без изменения средней температуры процесса может быть основан на использовании контролируемого нестационарного теплового режима. Проводя процесс термомиграции при наличии малых (порядка 1 К) колебаний температуры различной формы, можно обеспечить более высокую скорость движения включений, в том числе заставить мигрировать включения малых субмикронных размеров, что представляет интерес как способ удаления нежелательных включений из кристаллов. Колебания температуры позволяют также управлять формой включений и, следовательно, размерами перекристаллизованной области.

Характер влияния колебаний температуры на высокотемпературную термомиграцию в полупроводниковых кристаллах был подробно описан в обзоре [1]. Однако интерес представляет также возможность проведения нестационарной низкотемпературной термомиграции в кристаллах, прозрачных в видимой области спектра и используемых как элементы оптических систем (светоделители, окна для ИК спектроскопии, электрооптические модуляторы, преобразователи лазерного излучения). Одним из таких кристаллов является бромид калия. Прозрачные кристаллы привлекательны еще и тем, что можно непосредственно наблюдать за поведением включений с помощью микроскопа во время эксперимента по термомиграции

Для поиска нестационарных температурных режимов, при которых можно эффективно влиять на термомиграцию включений водных растворов КВг в кристалле КВг, была собрана экспериментальная установка, организованы автоматизированный контроль температуры в двух точках кристалла и управление напряжением нагревателя, с помощью которого в кристалле создается градиент температуры и ее колебания.

Для наблюдения за жидкими включениями использовался цифровой микроскоп, а для контроля температурного режима – разработанный программно-аппаратный комплекс [2], позволяющий контролировать напряжение нагревателя и следить за температурой и её градиентом внутри кристалла при помощи смонтированных в него термопар.

Нестационарный тепловой режим обеспечивался за счет программно управляемого включения и выключения напряжения, подаваемого на нагреватель, с задаваемой частотой. На рис.1 представлены данные о стационарном и нестационарном температурных режимах, которые удалось организовать на собранной экспериментальной установке. Как видно из рис.1, при периоде колебаний напряжения на нагревателе, равным 1 мин, амплитуда колебаний температуры в кристалле составляет не менее 1 К. Учитывая, что величина среднего градиента температуры в проведенном эксперименте была около 30 К/см, а толщины включений порядка 10–20 мкм, то перепад температур на движущихся включениях составлял 0,03–0,06 К. Это означает,

что амплитуда созданных колебаний температуры заметно превышает перепад температур на включениях и, согласно теории [1], можно ожидать влияние таких колебаний температуры на скорость и форму мигрирующих включений.

Из анализа видеосъемки проведенного пробного эксперимента по термомиграции включений следует, что в нестационарном тепловом режиме при средней температуре около 50 °С и среднем градиенте температуры около 30 К/см имеет место небольшое увеличение скорости миграции для некоторых включений, а заметного изменения их формы за время эксперимента (около 30 минут в каждом режиме) не наблюдалось.

В докладе обсуждаются возможности снижения тепловой инерционности нагревателя и применения дополнительного охлаждения образца для повышения скорости изменения температуры и обеспечения тем самым более эффективного влияния на скорость и форму включений.

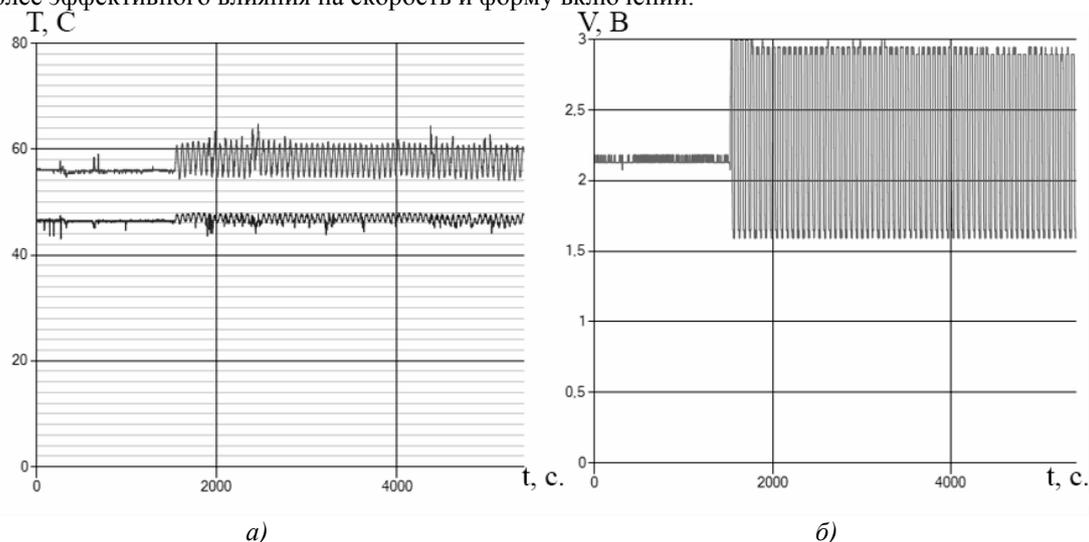


рис.1. Зависимости температуры в двух точках образца (а) и напряжения нагревателя (б) от времени в стационарном и нестационарном режимах.

Список публикаций:

- [1] Гершанов, В.Ю., Гармашов С.И. *Нелинейные нестационарные эффекты в процессах массопереноса* – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2014. 107 с.  
 [2] Гармашов С. И., Терехин К.А., Макинян Н.В., Иришин А.Г. Программно-аппаратный комплекс для контроля режимов управления видеосъемкой при проведении научных экспериментов // *Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: материалы XXVIII научной конференции (13–15 мая 2021 г., Ростов-на-Дону) [Электронное издание]* – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета. 2021. С. 119-121.

## Влияние добавления $Al(NO_3)_3$ на молекулярную подвижность в нитрате этиламмония по данным молекулярно-динамического моделирования

Убович Милош

Егоров Андрей Викторович

Санкт-Петербургский государственный университет

Чижик Владимир Иванович, д.ф.-м.н.

[ubovich.milosh@yandex.ru](mailto:ubovich.milosh@yandex.ru)

В настоящее время значительно вырос интерес к изучению ионных жидкостей (ИЖ). Характерная особенность ИЖ заключается в том, что они состоят из ионов, но, в отличие от «классических» солей, находятся в жидком состоянии при относительно низкой температуре (примерно до 100°C). ИЖ привлекают внимание исследователей своими уникальными свойствами, такими как высокая термальная стабильность, низкое давление паров и др. Эти свойства позволяют применять ИЖ в различных электрохимических приложениях (например, в ионно-литиевых батареях, топливных ячейках и т.д.). Аммониевые ИЖ отличаются необычным сочетанием свойств (в частности, обладают относительно невысокой стоимостью и низкой токсичностью). Характерным представителем аммониевых ИЖ является нитрат этиламмония (ЭАН). В работе в качестве основного объекта исследования были выбраны смеси ЭАН и нитрата алюминия ( $Al(NO_3)_3$ ). С помощью метода молекулярной динамики (МД) предпринята попытка выявить механизмы изменения

молекулярной подвижности при добавлении нитрата алюминия в ЭАН. Основной целью было не только количественно оценить кинетические характеристики компонентов смеси при их разном соотношении, но и выявить связь между возникающей при добавлении соли перестройкой локальной структуры и процессами вращательной переориентации ионов.

В работе промоделированы чистая ИЖ (ЭАН без добавок) и смеси с различным содержанием нитрата алюминия. Моделирование проводилось в кубической ячейке с периодическими граничными условиями в NPT ансамбле при 298 К и 1 атм. с помощью программного пакета MDynaMix v5.0 [1]. Температура поддерживалась постоянной с помощью термостата Нозе-Хувера [2, 3], давление – с помощью баростата Хувера [4]. Для описания межмолекулярного взаимодействия между катионами этиламмония ( $\text{ЭА}^+$ ) был выбран потенциал, предложенный в работах [5, 6]. Нитрат-анион рассматривался как четырёхцентровая плоская структура, в центре которой находится атом азота, а на расстоянии 1,22 Å от него расположены атомы кислорода, причём все углы O-N-O равны  $120^\circ$  [7]. Взаимодействие между атомами модельного нитрат-аниона и другими частицами представляет собой сумму кулоновского и леннард-джонсовского (12-6) потенциалов (в работе рассмотрено три различных варианта параметров [5, 8, 9]). Для описания иона алюминия использовался потенциал, предложенный в работе [10]. Уравнения движения решались методом Верле с шагом 2 фс. Время уравнивания системы каждой модельной системы составляло 2 нс, время последующего моделирования составило 1 нс.

Для указанных модельных систем рассчитаны различные функции радиального распределения, величины коэффициентов самодиффузии и времён переориентации внутримолекулярных векторов нитрат-аниона и катиона  $\text{ЭА}^+$ . В рамках исследования показано, что с увеличением концентрации нитрата алюминия в системе замедляются процессы переориентации нитрат-аниона и трансляционные движения компонент исследуемой системы. С помощью функций радиального распределения продемонстрировано, что ион алюминия не проникает в ближайшее окружение катиона  $\text{ЭА}^+$ . Однако появление трёхзарядных ионов алюминия оказывают заметное воздействие на упорядочение нитрат-анионов, в том числе входящих в окружение катиона  $\text{ЭА}^+$ , что и приводит к замедлению вращательной переориентации нитрат-аниона.

Список публикаций:

- [1] Lyubartsev A. P., Laaksonen A. // *Comp. Phys. Comm.* 2000. V. 128. No. 3. P. 565.
- [2] Nose S. // *Mol. Phys.* 1984. V. 52. No. 2. P.255.
- [3] Martyna G. J., Tobias D. J., Klein M. L. // *J. Chem. Phys.* 1994. V. 101. No. 5. P. 4177.
- [4] Martyna G. J., Tuckerman M. E., Tobias D. J., et al. // *Mol. Phys.* V. 87. No. 5. P. 1117.
- [5] Umebayashi Y., Chung W.-L., Mitsugi T., et al. // *J. Comput. Chem. Jpn.* 2008. V. 7. No. 4. P. 125.
- [6] Choe J., Kim K., Chang S. // *Bull. Korean Chem. Soc.* 2000. V. 21. P. 200.
- [7] Ebner C., Sansone R., Hengrasmee S., et al. // *Int. J. Quant. Chem.* 1999. V. 75. P. 805.
- [8] Megyes T., Balint S., Peter E., et al. // *J. Phys. Chem. B.* 2009. V. 113. No. 13. P. 4054.
- [9] Laaksonen A., Kovacs H. // *Can. J. Chem.* 1994. V. 72. P. 2278.
- [10] Faro T. M. C., Thim G. P., Skaf M. S. // *J. Chem. Phys.* 2010. V. 132. P. 11450.



## 10 - Астрофизика, физика космоса

Смирнова Ксения Ильдаровна, инженер-исследователь

Екатеринбург, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт естественных наук и математики

**Исследование параметров межзвездной среды в галактиках с недавним звездообразованием**

e-mail: [Arashu@rambler.ru](mailto:Arashu@rambler.ru)

стр. 84

## Исследование параметров межзвездной среды в галактиках с недавним звездообразованием

Смирнова Ксения Ильдаровна<sup>1</sup>

Вибе Дмитрий Зигфридович<sup>2</sup>, Моисеев Алексей Валерьевич<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет

<sup>2</sup>Институт Астрономии РАН, <sup>3</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
[Arashu@rambler.ru](mailto:Arashu@rambler.ru)

Ранее мы исследовали галактику с полярным кольцом (ГПК) NGC 660 в различных диапазонах, и нашли различие в инфракрасном (ИК) диапазоне для областей звездообразования кольца и диска галактики. А именно, потоки областей кольца в ближнем и дальнем ИК диапазоне были значительно меньше, чем потоки у областей диска. Это различие мы связали с различным возрастом данных объектов, области кольца формировались позже, соответственно они могут быть более молодые, сем области диска галактики.

Эту интересную зависимость, хотелось бы проверить у других галактик подобного типа, но, к сожалению, не смотря на наличие нескольких каталогов [1-3] ГПК (суммарное количество объектов около 400 штук), никто из них больше не располагал нужным набором наблюдательных данных. В связи с этих нам пришлось обратиться к другим объектам, в процессе эволюции которых могут возникать условия, способствующие образованию новых областей звездообразования.

Подходящими кандидатами оказались галактики со смещенными барами, в которых наблюдается смещение центральной перемычки относительно фотометрического и/или кинематического центров диска, которое может быть вызвано сильным приливным воздействием или столкновением двух галактик с последующим слиянием, а также взаимодействующие галактики, где само взаимодействие галактик может вызвать волну ЗО в одной из них.

Таким образом, нам удалось найти еще три галактики для нашего исследования. Для сопоставления полученных результатов мы использовали галактику сравнения NGC 628. Хочется отметить, что одна галактика, из нашей выборки имела данные в дальнем ИК диапазоне, что позволило нам проследить выделенную зависимость (ту, что мы нашли в NGC 660) во всех трех диапазонах ИК спектра.

Список публикаций:

[1] Whitmore B.C. et al. // *The Astronomical Journal*. 1990. Vol. 100, p. 1489.

[2] Moiseev, A.V., Smirnova, K.I., Smirnova, A.A., Reshetnikov, V.P. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2011. V. 418, № 1, pp. 244-257.

[3] Reshetnikov V.P., Mosenkov A.V. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 483, № 2, pp. 1470-1480.

## 11 - Биофизика, медицинская физика

Жуковская Анастасия Алексеевна, магистрант 2 года обучения  
Томск, Томский государственный университет, физический

**Влияние скорости сдвига на характеристики начальных фаз свертывания нативной крови**

Демкин Владимир Петрович; Удут Владимир Васильевич, д.ф.-м.н.; д.м. н.

e-mail: [nastya120498z@mail.ru](mailto:nastya120498z@mail.ru) стр. 86

Колесник Ольга Владиславовна, аспирант 3 года обучения  
Красноярск, Красноярский научный центр ФИЦ СО РАН, Институт биофизики СО РАН

**Низкоинтенсивное воздействие Th-232 на биолюминесцентные клеточные системы. Роль активных форм кислорода**

Кудряшева Надежда Степановна, д.ф.-м.н.

e-mail: [OV.Kolesnik@yandex.ru](mailto:OV.Kolesnik@yandex.ru) стр. 87

Кудояров Данил Шамилевич, аспирант 1 года обучения  
Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Визуализация молекул олигонуклеотидов dT<sub>12</sub> и измерение их вольтамперных характеристик**

Шарипов Талгат Ишмухамедович, к.ф.-м.н.

e-mail: [danilkud@mail.ru](mailto:danilkud@mail.ru) стр. 88

Лысенко Виктория Юрьевна, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Локальное окружение ионов цинка в слоях арахидоновой кислоты: рентгеноспектральная диагностика**

Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.

e-mail: [viktoriya.250699@mail.ru](mailto:viktoriya.250699@mail.ru) стр. 90

Пронина Екатерина Вячеславовна, аспирант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Исследование дополнительных центров связывания ионов цинка в гемоглобине: рентгеновская спектроскопия поглощения**

Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.

e-mail: [ev\\_pronina\\_105@mail.ru](mailto:ev_pronina_105@mail.ru) стр. 91

Сушко Екатерина Сергеевна, аспирант 4 года обучения  
Красноярск, Красноярский научный центр ФИЦ СО РАН

**Токсичность и антиоксидантная активность эндоэдрального Gd-содержащего фуллеренола. Роль активных форм кислорода в клеточных и ферментативных процессах**

Кудряшева Надежда Степановна, д.ф.-м.н.

e-mail: [kkovel@yandex.ru](mailto:kkovel@yandex.ru) стр. 93

Шупова Елизавета Витальевна, аспирант 1 года обучения  
Севастополь, Севастопольский государственный университет, радиоэлектроники и информационной безопасности

**Исследование комплексообразования (4-(4-(диметиламино)стирил)-6-метил)-пиримидинил-2-тиоцианата с кофеином методом УФ/видимой спектроскопии**

Бучельников Анатолий Сергеевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [liza.shupova@mail.ru](mailto:liza.shupova@mail.ru) стр. 94

## Влияние скорости сдвига на характеристики начальных фаз свертывания нативной крови

*Жуковская Анастасия Алексеевна*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

*Демкин Владимир Петрович, д.ф.-м.н.*

*Удуг Владимир Васильевич, д.м.н.*

*[nastya120498z@mail.ru](mailto:nastya120498z@mail.ru)*

Коагуляция крови является крайне сложным и еще не до конца изученным биохимическим процессом. Он активизируется при повреждении стенки кровеносного сосуда и ведет к превращению плазмы крови в фибриновый сгусток, останавливающий кровотечение. Изучение реологического поведения крови очень важно для понимания кровотока, что помогает выявлять и, следовательно, лечить сердечно-сосудистые заболевания и их осложнения.

Нативная кровь хорошо описывается в рамках реологической модели как жидкость, обладающая вязкоупругими свойствами. Основным реологическим уравнением для таких жидкостей является  $\tau = \eta\dot{\gamma}$ , где  $\tau$  – тензор касательных напряжений;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвиговой деформации;  $\eta$  – динамическая вязкость. При низких скоростях сдвига  $\dot{\gamma}$  пространственная структура основных форменных элементов – эритроцитов не разрушается и обуславливает пороговое поведение сдвиговой деформации, при которой проявляются упругие свойства крови. При высоких скоростях  $\dot{\gamma} > 200 \text{ с}^{-1}$  пространственная структура эритроцитов разрушается, что вызывает эффект сдвигового разжижения крови и уменьшение вязкости [1].

Одним из методов лабораторной диагностики системы гемостаза является метод низкочастотной пьезотромбоэластографии (НПТЭГ), который регистрирует изменение сопротивления исследуемой жидкости резонансным колебаниям иглы-резонатора пьезоэлектрического датчика. Благодаря высокой чувствительности метода можно визуализировать информацию на всех звеньях коагуляции крови: от инициации до формирования фибринового сгустка, что обеспечивает широкое применение данного метода.

Неньютоновское поведение крови в реальных потоках сильно отличается от соответствующего поведения в установившемся потоке. Поэтому при моделировании гемодинамики, необходимо выбирать реологическую модель, максимально соответствующую реальным клиническим условиям.

Существенная зависимость динамической вязкости от биохимического состава крови и внешних факторов окружающей среды обуславливает принципиальные различия в характере течения крови и, соответственно, порождает разнообразие реологических моделей крови.

Данная работа посвящена изучению двух реологических моделей: модель Quemada и модель Walburn-Schneck [2] и их последующему сравнению с экспериментом.

Первая модель учитывает влияние гематокрита  $Ht$  на вязкость крови. Следуя работе [2], динамическая вязкость крови определяется формулой (1):

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_p \left( 1 - \frac{\frac{1}{2} k_0 + k_\infty \sqrt{\frac{\dot{\gamma}}{\gamma_c}}}{1 + \sqrt{\frac{\dot{\gamma}}{\gamma_c}}} Ht \right)^{-2}, \quad (1)$$

где  $\eta_p = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $k_\infty = 2,07$ ;  $k_0 = 4,33$ ;  $\gamma_c = 1,88 \text{ с}^{-1}$ .

Вторая модель - Walburn-Schneck, отражает статистическую корреляцию между двумя наиболее значимыми внутренними параметрами крови (гематокрит и концентрация белков в плазме). Динамическая вязкость крови определяется формулой:

$$\eta(\dot{\gamma}) = C_1 * e^{C_2 * Ht} * e^{\frac{C_4 * TPMA}{Ht^2}} * \dot{\gamma}^{-C_3 * Ht} \quad (2)$$

где  $C_1 = 0,797 \text{ мПас}$ ,  $C_2 = 0,0608$ ,  $C_3 = 0,00499$ ,  $C_4 = 14,585 \text{ л/г}$ ,  $TPMA = 25 \text{ г/л}$  - (концентрация белков крови без альбумина).

На рис. 1 приведены результаты расчетов  $\eta(\dot{\gamma})$  по формулам (1-2) и сравнение их с измеренной в работе [3] вязкостью. Экспериментальные значения  $\eta(\dot{\gamma})$  соответствуют группе клинически здоровых людей в возрасте от 54 до 59 лет без сердечно-сосудистой патологии, не имевших в течение 3-х месяцев клинических и лабораторных признаков острых или обострения хронических заболеваний. Гематокрит считается равным 45 % для всех трех случаев.

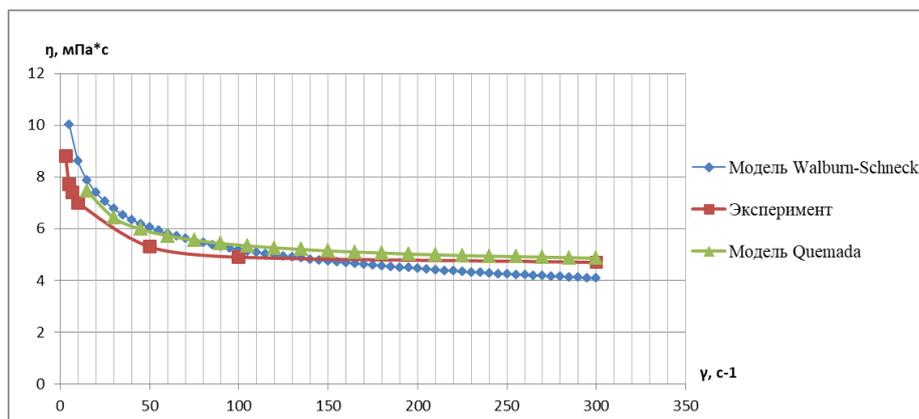


рис. 1 Сравнение моделей Walburn-Schneck и Quemada с экспериментом

Из рисунка видно, что модель Quemada (1) дает лучшее согласие с экспериментом, чем модель Walburn-Schneck (2). Вероятно, это связано с тем, что в модели (2) не учитываются альбумины, концентрация которых сравнима с концентрацией глобулинов, но их вклад в изменение вязкости противоположен вкладу глобулинов. Хорошо известно, что плазменные факторы вносят существенный вклад в вязкость крови при малых скоростях сдвига. Поэтому в области малых скоростей сдвига наблюдается значительное расхождение модели (1), чем модели (2), с экспериментом. В области больших значений скоростей сдвига также модель (1) дает лучшее согласие с экспериментом.

Список публикаций:

- [1] Демкин В.П., Мельничук С.В., Удут В.В., Тютрин И.И., Руденко Т.В., Криницына Д.Б.// Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62, №12. – С.55–62.  
 [2] Zineb Mimouni. The Rheological Behavior of Human Blood-Comparison of Two Models //Open Journal of Biophysics, 2016, 6, 29-33.  
 [3] Ажермачева М.Н. Нарушение реологических свойств крови при острых и хронических ишемических нарушениях мозгового кровообращения// Journal of Siberian Medical Sciences, 2014, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/narushenie-reologicheskikh-svoystv-krovi-pri-ostryh-i-hronicheskikh-ishemicheskikh-narusheniyah-mozgovogo-krovoobrascheniya>.

## Низкоинтенсивное воздействие Th-232 на биолюминесцентные клеточные системы. Роль активных форм кислорода

**Колесник Ольга Владиславовна**

*Рожко Татьяна Владимировна, Лапина Мария Александровна, Соловьёв Владислав Сергеевич,*

*Сачкова Анна Сергеевна, Кудряшева Надежда Степановна*

*Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН*

*Кудряшева Надежда Степановна, д.ф.-м.н.*

*[OV.Kolesnik@yandex.ru](mailto:OV.Kolesnik@yandex.ru)*

Морские люминесцентные бактерии являются удобным биотестовым объектом и широко используются в качестве биотеста для мониторинга токсичности окружающей среды. Физиологическая активность бактерий оценивается по интенсивности их свечения. Высокая скорость регистрации интенсивности люминесценции с помощью современных люминометров (1-3 минуты) и простота тестируемого организма позволяют одновременно проводить большое количество измерений, что обеспечивает достоверность статистической обработки результатов. Морские бактерии можно рассматривать как простые одноклеточные модели живых объектов и использовать для прогнозирования результатов радиационного воздействия на более сложные многоклеточные организмы.

В ходе жизнедеятельности бактерий продуцируются активные формы кислорода (АФК), которые являются естественными побочными продуктами метаболических окислительных процессов и играют важную роль в поддержании гомеостаза и в передаче клеточных сигналов (внутриклеточные мессенджеры). Различные воздействия на бактериальную культуру, включая радиоактивное ионизирующее излучение, способны изменять производство АФК. Ранее было продемонстрировано, что АФК участвуют в активации физиологических функций люминесцентных бактерий под действием бета-излучающего радионуклида трития. Особый интерес представляет вопрос: отвечают ли АФК за биоэффекты других радионуклидов с другими характеристиками радиоактивного распада?

Целью работы было изучение низкоинтенсивного воздействия тория-232 на люминесценцию морских бактерий *Photobacterium phosphoreum* и выявление роли АФК в протекающих процессах. Молекулярные механизмы биологических откликов на низкоинтенсивные воздействия тория представляют практический интерес, т.к. они позволяют прогнозировать реакцию живых организмов на низкодозовую радиацию на больших территориях в таких ситуациях, как аварии на атомных станциях, при добыче полезных ископаемых, нефти и др.

Торий – один из самых распространённых радиоактивных элементов в природных экосистемах. Его наиболее долгоживущий изотоп –  $^{232}\text{Th}$  характеризуется периодом полураспада  $14 \cdot 10^9$  лет, что приблизительно в три раза превышает возраст Земли (поэтому практически весь природный торий представлен исключительно этим нуклидом). В окружающей среде торий содержится в угле, который используется в качестве топлива для ТЭЦ. Наряду с ураном, торий считается наиболее важным источником ядерной энергии, и в настоящее время ему уделяется внимание ввиду возможности его применения в качестве более чистого, безопасного и более распространённого ядерного топлива. Кроме того, торий используется для производства керамики, сварочных электродов, объективов для фотоаппаратов и телескопов, огнеупорного кирпича, термостойких красок и материалов для аэрокосмической промышленности. Несмотря на распространённость данного элемента, в настоящее время влияние радиоактивного тория на живые организмы изучено недостаточно. В качестве объекта исследования были использованы интактные бактерии *Photobacterium phosphoreum*. Источником облучения служил азотнокислый Th-232 ( $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ); доза облучения бактериальной культуры не превышала 0,1 Гр, что не превышает условную границу низких доз. Была изучена кинетика люминесценции бактерий в растворах с различной концентрацией Th-232 ( $10^{-11}$  –  $10^{-3}$  М), одновременно определялось содержание АФК с помощью хемилюминесцентного люминольного метода. Измерения интенсивности биолюминесценции и хемилюминесценции проводили с помощью планшетного люминометра Luminoskan Ascent (Thermal Fisher Corp.). Все измерения проводились при  $+20$  °С.

Было обнаружено, что Th-232 умеренно активирует клеточные процессы при низкодозовом воздействии ( $<0,1$  Гр). Была выявлена отрицательная корреляция между интенсивностью биолюминесценции бактерий и содержанием АФК ( $r = -0,60$ ,  $p < 0,05$ ) в диапазоне низких концентраций тория ( $10^{-11}$ – $10^{-6}$  М). Можно сделать вывод, что активация бактериальной биолюминесценции связана с усилением окислительно-восстановительных процессов в водных средах и потреблением бактериями АФК.

Полученные результаты способствуют пониманию молекулярного механизма «гормезисных» ответов клеток на низкоинтенсивные радиоактивные воздействия. В данном исследовании Th-232 использовался как представитель группы альфа-излучающих радионуклидов. Результаты выявляют особенности механизма воздействия низкоинтенсивного радиоактивного облучения на живые организмы и способствуют дальнейшей адаптации биолюминесцентных методов к целям радиэкологического мониторинга.

## **Визуализация молекул олигонуклеотидов $dT_{12}$ и измерение их вольтамперных характеристик**

<sup>1</sup>*Кудояров Данил Шамилевич*

<sup>1</sup>*Шарипов Талгат Ишмухамедович*

<sup>2</sup>*Алибай Темирулан Талгатулы*

<sup>1</sup>*Башкирский государственный университет*

<sup>2</sup>*Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева*

*Шарипов Талгат Ишмухамедович, к.ф.-м.н.*

*[danilkud@mail.ru](mailto:danilkud@mail.ru)*

Цель исследования состояла в визуализации и определении проводимости олигонуклеотидов, которые состоят только из одного вида нуклеотидов: тимина ( $dT_{12}$ ). Для визуализации олигонуклеотидов использовали атомно-силовой микроскоп (АСМ), для определения вольтамперных характеристик применяли сканирующий туннельный микроскоп (СТМ).

Олигонуклеотиды - это короткие синтетические одноцепочечные участки ДНК в среднем от 15 до 50 нуклеиновых оснований. Их получают как путём химического синтеза, так и расщеплением более длинных полинуклеотидов.

Для исследования были использованы олигонуклеотиды с повторяющейся последовательностью, состоящие из 12 одинаковых звеньев тимина. Образцы хранились в морозильной камере для сохранности. Перед исследованием образцы размораживали в течении 1-2 часов.

Раствор олигонуклеотидов в концентрации 1 нг/мкл нагревали до 85 градусов, для этого эппендорф с раствором держали в горячей воде в течении 6 минут. Эту процедуру проводили для разворачивания молекул, так как они находятся в состоянии глобул. Для визуализации олигонуклеотидов и оценки их осаждаемости на поверхность подложки использовали АСМ.

В исследованиях в качестве подложек применяли серебро, термически напыленное в вакууме на поверхность слюды. На подложку наносили каплю олигонуклеотидов объемом 5 мкл. После чего, ждали полного высыхания капли на подложке. Высыхание занимало примерно 60 минут.

Сначала в режиме прерывистого контакта получали АСМ-изображение олигонуклеотидов на подложке (рис. 1). Далее проводили анализ полученного АСМ-изображения для того, чтобы оценить как олигонуклеотиды располагались на подложке. Нам нужно было добиться наименьшего слипания молекул.

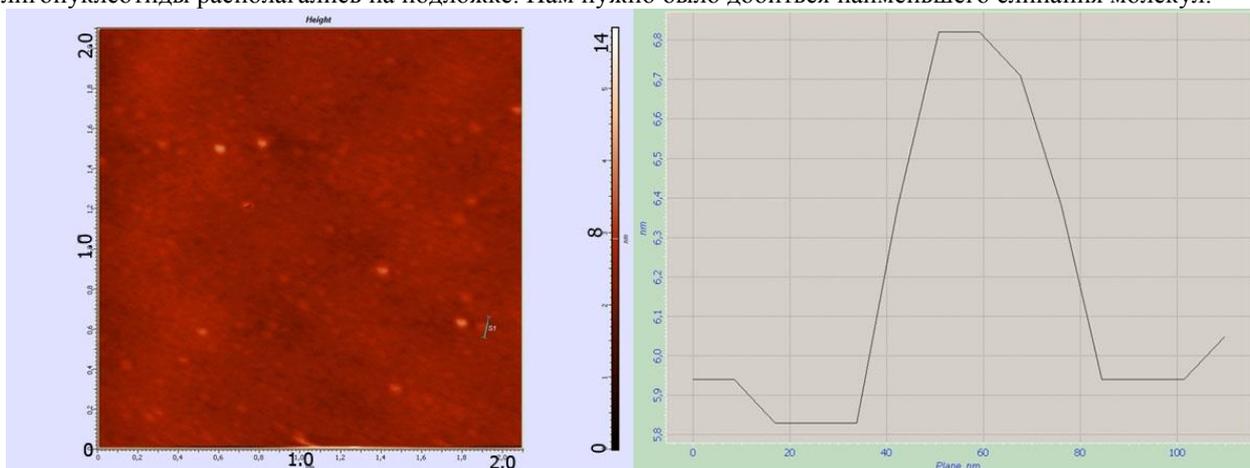


рис.1. АСМ-изображение (слева) олигонуклеотидов  $dT_{12}$ , осажденных на серебряную подложку, и профиль сечения, проведенного по одной из молекул.

Затем этот же образец исследовали методом СТМ, используя режим туннельной спектроскопии, измеряли вольтамперные характеристики олигонуклеотидов. Сначала получили СТМ-изображение поверхности подложки с напыленной на нее пленкой серебра и измерили её вольтамперную характеристику. После чего были исследованы олигонуклеотиды и получены их ВАХ (рис 2).

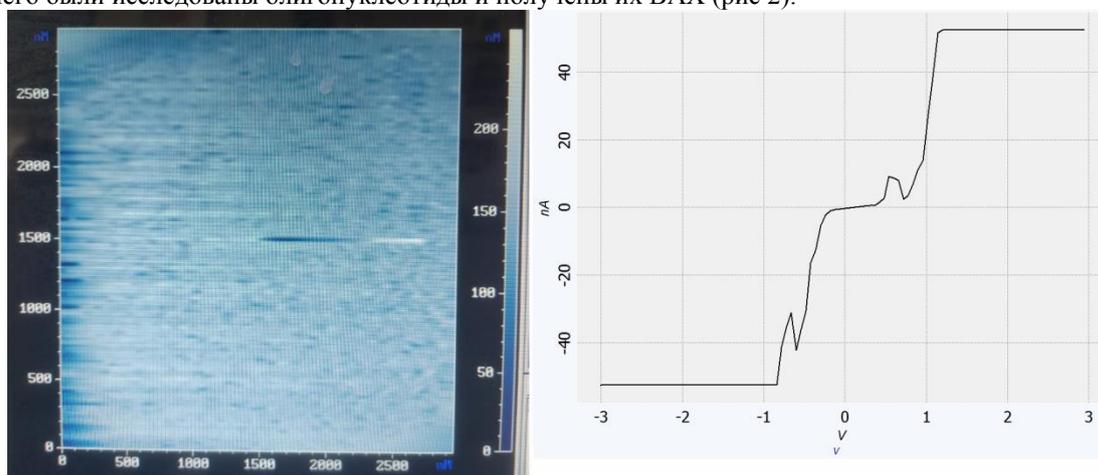


рис.2. СТМ-изображение (слева) олигонуклеотидов  $dT_{12}$ , осажденных на серебряную подложку, и ВАХ (справа)

Можно сказать, что проводимость исследуемых олигонуклеотидов ниже, чем проводимость серебрянного напыления. Полученные данные в будущем могут быть использованы для сравнительного анализа проводимости других нуклеотидов.

Список публикаций:

- [1] Шарипов Т.И., Гарифутдинов Р.Р., Бахтизин Р.З. Исследование одноцепочечных ДНК с повторяющейся нуклеотидной последовательностью методами сканирующей зондовой микроскопии. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Том 84. № 5. С. 675-678.
- [2] Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2008. – № 5. – С. 7 – 14.

## Локальное окружение ионов цинка в слоях арахидиновой кислоты: рентгеноспектральная диагностика

Лысенко Виктория Юрьевна

Кременная Мария Андреевна, Недоедкова Ольга Вадимовна

Южный федеральный университет

Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.

[viktoriya.250699@mail.ru](mailto:viktoriya.250699@mail.ru)

Биомембраны выполняют как барьерную, так и транспортную функции для взаимодействия клетки с внешней средой, а также являются средой протекания множества биохимических процессов. Взаимодействие ионов металлов с клеточной мембраной имеет большое значение для многих процессов, протекающих в организме человека. Жизненно важные клеточные процессы зависят от контролируемого транспорта ионов металлов через липидные слои, входящие в состав биомембран. Арахидиновая кислота является адекватной моделью липидного слоя биомембраны. Изучение взаимодействия ионов цинка со слоем арахидиновой кислоты позволяет исследовать механизмы транспорта ионов цинка через биомембрану. Одним из лучших методов, исследующих механизмы взаимодействия липид-металл, является метод рентгеновской спектроскопии поглощения в режиме выхода флуоресценции в условиях полного внешнего отражения. Данный метод применяется в том числе для изучения локальной атомной и электронной структуры ионов металлов при их взаимодействии с липидным слоем на поверхности жидкости в режиме реального времени.

Проведен анализ экспериментальных спектров рентгеновского поглощения для К-краев цинка в липидных слоях арахидиновой кислоты на поверхности жидкости во флуоресцентной моде в условиях полного внешнего отражения полученных в работе [1]. Анализ проводился по методу «отпечатка пальца». Метод состоит в сопоставлении экспериментальных спектров исследуемых соединений с экспериментальными спектрами известных соединений, что позволяет с определенной точностью определить локальную структуру вокруг исследуемого элемента.

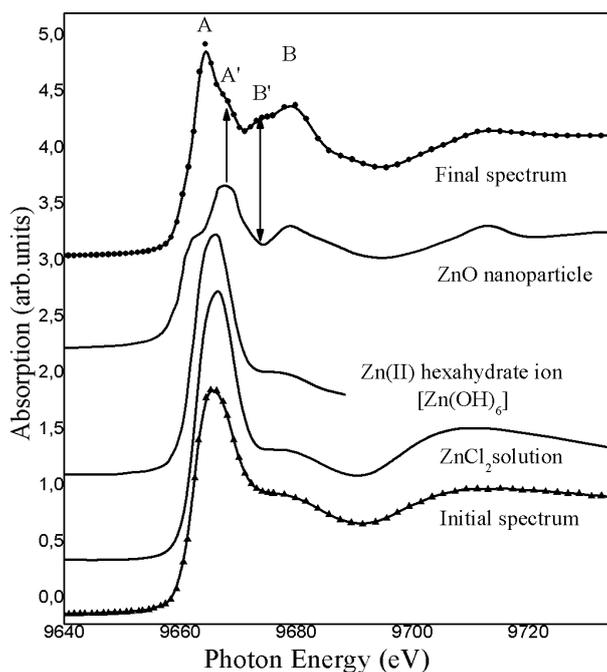


рис. 1. Сравнение экспериментальных начального и конечного спектра XANES для К-края цинка водного раствора  $ZnCl_2$  в липидном слое арахидиновой кислоты с экспериментальными спектрами взятыми из литературы: спектр для раствора  $ZnCl_2$  [2], гексагидрат иона  $Zn(II)$   $Zn(OH)_6$  [3] и наночастиц  $ZnO$  [4] (кривые нормированы на главный максимум и смещены по вертикали).

Результаты проведенного анализа показали, что изменения в экспериментальных спектрах являются результатом изменения локального окружения ионов цинка в процессе эксперимента по сравнению с его окружением в  $ZnCl_2$ . На начальном этапе измерений ионы цинка окружены молекулами воды. Дальнейший процесс взаимодействия монослоя арахидиновой кислоты и раствора  $ZnCl_2$  не приводит к образованию наночастиц оксида цинка под слоем арахидиновой кислоты, как это наблюдалось для случая солей никеля [5]. Предполагается, что наблюдаемые изменения связаны с взаимодействием полярных групп молекул арахидиновой кислоты с ионами цинка из водного раствора.

Авторы выражают благодарность Гранту Президента МК-2767.2021.1.2 за финансовую поддержку исследования.

Список публикаций:

- [1] Kremennaya M. A., Lysenko V. Yu., Novikova N. N., Yakunin S. N., Rogachev A. V., Yalovega G. E. // *Journal of Physics: Conference Series*: 2021. №2103, С. 012171.
- [2] Novikova N. N., Kovalchuk M. V., Yurieva E. A., Kononov O. V., Stepina N. D., Rogachev A. V., Yalovega G. E., Kosmachevskaya O. V., Topunov A. F., Yakunin S. N. // *Journal of Physical Chemistry B*. 2019 Vol. 123 pp 8370–8377.
- [3] Takahashi M., Tanida H., Kawachi S., Harada M., Watanabe I. // *Journal of Synchrotron Radiation*: 1999 Vol. 6 pp 278-280
- [4] Daley T., Raj E., Ramos S., Cibir G., Dent A., Hyde T. I., Sankar G. // *Journal of Physics*: 2013 №430 012080
- [5] Chumakov A., Al-Alwani A. J., Ermakov A., Shinkarenko O., Begletsova N., Glukhovskoy E., Santer S. // *Journal of Physics*: 20018 №1124 081009

## **Исследование дополнительных центров связывания ионов цинка в гемоглобине: рентгеновская спектроскопия поглощения**

**Пронина Екатерина Вячеславовна**

*Кременная Мария Андреевна, Лысенко Виктория Юрьевна*

*Южный федеральный университет*

*Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.*

*[ev\\_pronina\\_105@mail.ru](mailto:ev_pronina_105@mail.ru)*

Для выявления молекулярных механизмов изменения способности белковых молекул связывать металлы в условиях, моделирующих эндогенную интоксикацию в организме определение координационного окружения металлов проводилось с помощью спектроскопии XANES.

Белковые структуры выполняют витально важные функции в живых организмах, в частности, в организме человека. Они обладают способностью к транспортировке газов и микроэлементов, участвуют в катализе и могут отвечать за патогенез различных заболеваний. Под действием неблагоприятных экзогенных и эндогенных факторов - повышенного радиационного фона, экологических загрязнений, окислительного и термического стресса наблюдается прогрессирующее аномальное накопление ионов металлов на биоорганических макромолекулах. Экзогенная и эндогенная интоксикации, являются важным фактором, оказывающим значительное влияние на структурные и функциональные свойства белков в организме и, как правило, на взаимодействие белка с металлом. Много усилий направлено на выяснение механизмов, с помощью которых различные токсиканты модифицируют структуру белка.

Известно, что нарушение пространственной структуры белка может приводить к образованию нефункциональных структур или белков со сниженной активностью при формации комплексов с переходными металлами [1], [2]. Одной из самых значимых белковых структур для жизнедеятельности человека является гемоглобин. Как известно, в активном центре гемоглобина располагаются ионы железа, которые отвечают за транспорт кислорода в организме. Однако под воздействием неблагоприятных экзогенных и эндогенных факторов в гемоглобине могут возникать дополнительные центры связывания, которые могут связывать такие нетипичные для гемоглобина ионы как цинк.

С помощью спектроскопии XANES нами были исследованы возможные структурные модели центров связывания гемоглобина с ионами цинка: модель замещения иона железа на ион цинка и модель связывания цинка с гистидином (Рис. 1). Для данных моделей были рассчитаны теоретические спектры рентгеновского поглощения для К-края цинка (Рис. 2) и сопоставлены с экспериментальным спектром из работы [3].

Как показало сопоставление экспериментального и теоретических спектров поглощения, спектры рентгеновского поглощения чувствительны к изменениям локальной структуры цинка в белках, а связывание ионов цинка в молекуле гемоглобина через гистидин более вероятно, чем замещение иона железа на ион цинка в плоскости порфирина.

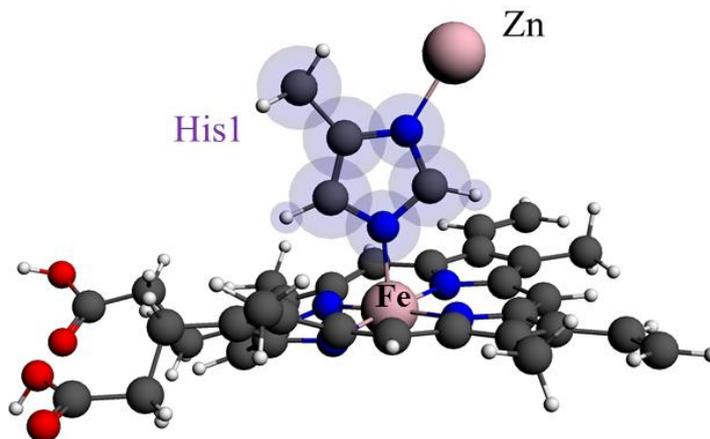


рис.1– Модель присоединения цинка на гистидин, центральный атом в плоскости порфирина – железо.

Проанализированные данные позволяют утверждать, что методом рентгеновского поглощения при использовании моделирования и теоретических расчетов спектров возможно определить локализацию присоединенного атома цинка, которая с наибольшей вероятностью располагается вблизи аминокислоты гистидин.

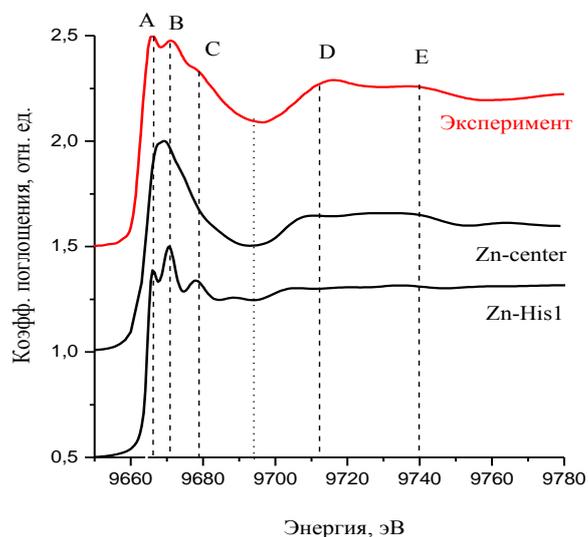


рис.2 - Сравнение экспериментального спектра рентгеновского поглощения для K-края Zn в гемоглобине [3] с теоретическими спектрами для структурных моделей центров связывания ионов цинка в гемоглобине.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МК-2767.2021.1.2.

Список публикаций:

1. Gomes, Cláudio M. (2019). *Biophysical and Spectroscopic Methods for Monitoring Protein Misfolding and Amyloid Aggregation* // [Methods in Molecular Biology, Protein Misfolding Diseases Volume 1873 (Methods and Protocols), 10.1007/978-1-4939-8820-4(Chapter 1), 3–18.
2. Reeg, Sandra; Grune, Tilman, *Protein Oxidation in Aging: Does It Play a Role in Aging Progression?* // *Antioxidants & Redox Signaling*, 2015, 23(3), 239–255.
3. Н. Н. Новикова, С. Н. Якунин, М. В. Ковальчук, Э. А. Юрьева, Н. Д. Степина, А. В. Рогачев, М. А. Кремённая, Г. Э. Яловега, О. В. Космачевская, А. Ф. Топунов *Возможности рентгеновской абсорбционной спектроскопии в геометрии полного внешнего отражения для исследования белковых пленок на жидкости*//*Кристаллография*. 2019. Т.64, №6, с.931-937

# Токсичность и антиоксидантная активность эндодрального Gd-содержащего фуллеренола. Роль активных форм кислорода в клеточных и ферментативных процессах

Сушко Екатерина Сергеевна

Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук

Кудряшева Надежда Степановна, д.ф.-м.н.

[kkovel@yandex.ru](mailto:kkovel@yandex.ru)

Фуллеренолы (углеродные водорастворимые биологически активные наночастицы, полигидроксилированные производные фуллеренов) являются перспективными агентами для разработки лекарственных препаратов. Фуллеренолы, содержащие гадолиний, могут быть перспективными кандидатами для использования в качестве новых контрастных агентов для магнитно-резонансной томографии (МРТ). Наиболее широко используемыми Gd-содержащими соединениями являются гадолиамид, гадопентетат dimeглюмин, гадотерат меглюмин и др. [1-2]; однако есть опасения, что эти вещества могут быть токсичными [2]. Производные металлофуллерена удерживают токсичные ионы  $Gd^{3+}$  в инертной, но прочной углеродной оболочке, предотвращая их высвобождение.

В работе проведен анализ токсичности и антиоксидантной активности эндодрального Gd-содержащего фуллеренола с 40-42 кислородсодержащих группами (Gd@F). Для мониторинга токсичности и антиоксидантной активности Gd@F в модельных растворах использовали люминесцентные клеточные и ферментативные биотесты (светящиеся морские бактерии и их ферментативные реакции, соответственно), где главный тестируемый параметр физиологической активности – интенсивность биолюминесценции. Для характеристики токсичности Gd@F определяли эффективные концентрации, ингибирующие биолюминесценцию тестовых систем на 50%. Антиоксидантную активность Gd@F изучали в растворах модельных окислителей (1,4-бензохинона и  $K_3[Fe(CN)_6]$ ); по уменьшению общей и окислительной токсичности растворов рассчитывали коэффициенты детоксикации. Содержание активных форм кислорода (АФК) оценивали в экспериментальных растворах, определяли корреляции с токсичными/антиоксидантными характеристиками.

Gd@F ингибировал биолюминесценцию биотестовых систем при высоких концентрациях ( $>2 \cdot 10^{-1}$  г/л), проявляя меньшую токсичность по сравнению с ранее изученными фуллеренолами [3]. Эффективная активация бактериальной биолюминесценции (до 100%) наблюдалась при воздействии низкой концентрации Gd@F ( $10^{-3}$  г/л –  $2 \cdot 10^{-1}$  г/л). Была изучена антиоксидантная способность фуллеренола Gd@F. Особые биоэффекты Gd@F (низкая токсичность, активация биолюминесценции бактерий низкими концентрациями, эффективная антиоксидантная способность) были объяснены гидрофобными взаимодействиями, сродством к электрону и нарушением баланса АФК в биолюминесцентных системах.

В работе продемонстрирован высокий потенциал люминесцентных биотестов для сравнения токсичности и антиоксидантной активности углеродных наноструктур.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научных проектов № 18-29-19003; №20-44-243001.

Список публикаций:

- [1] Maravilla K. R., San-Juan D., Kim S. J., Elizondo-Riojas G., Fink J. R., Escobar W., Bag A., Roberts D. R., Hao J., Pitrou C., Tsiouris A. J., Herskovits E., Fiebach J. B. // *American Journal of Neuroradiology*. 2017. V38. №9. p.1681–1688.
- [2] Ersoy H., Rybicki F. J. // *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2007. V26. №5. p.1190–1197.
- [3] Kovel E. S., Sachkova A. S., Vnukova N. G., Churilov G. N., Knyazeva E. M., Kudryasheva N. S. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. V20. №9. 2324.

# Исследование комплексообразования (4-(4-(диметиламино)стирил)-6-метил)-пиримидинил-2-тиоцианата с кофеином методом УФ/видимой спектроскопии

Шупова Елизавета Витальевна

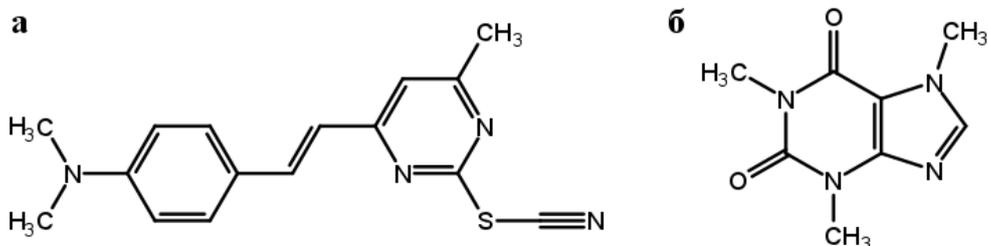
Папонов Борис Владимирович

Севастопольский государственный университет

Бучельников Анатолий Сергеевич, к.ф.-м.н.

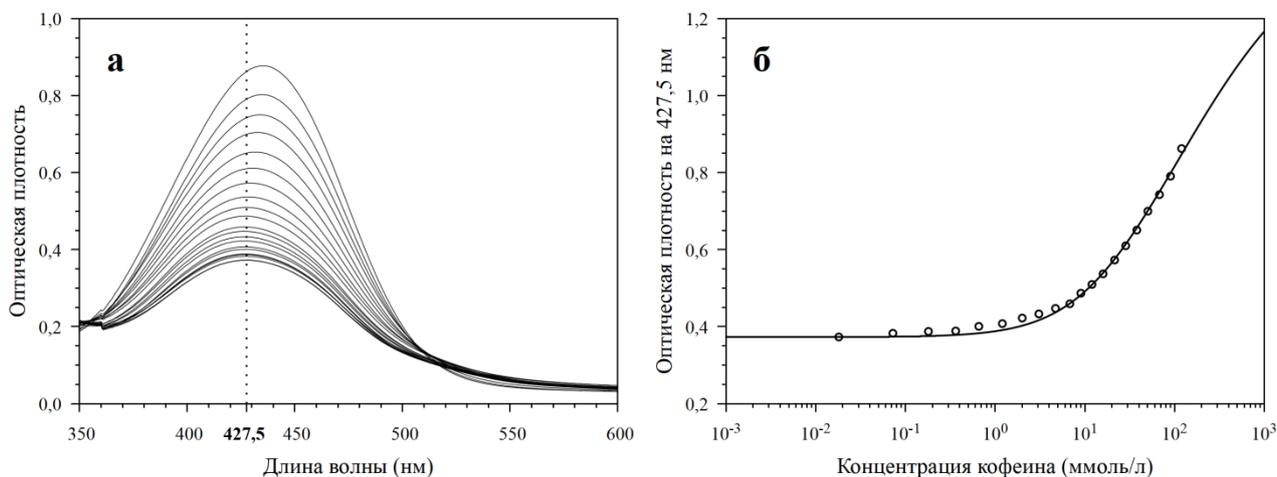
[liza.shupova@yandex.ru](mailto:liza.shupova@yandex.ru)

С целью поиска новых соединений, активных в отношении грибов, бактерий, в также, возможно, злокачественных новообразований, нами был синтезирован (4-(4-(диметиламино)стирил)-6-метил)-пиримидинил-2-тиоцианат **1**, структурная формула которого изображена на *рис.1а*. Существуют основания полагать, что соединение **1** обладает высокой аффинностью к нуклеиновым кислотам, в частности, к ДНК, что может обуславливать его биологический эффект (ДНК-тропность). Поскольку молекула ДНК состоит из двух видов азотистых оснований, пиримидиновых и пуриновых, имеет смысл в качестве пилотного эксперимента провести оценку взаимодействия соединения **1** с веществом, структурно схожим с основаниями ДНК. Таким веществом является, например, производное пурина кофеин (1,3,7-триметилксантин; *рис.1б*). Таким образом, целью настоящей работы явилось исследование комплексообразования соединения **1** с кофеином, состоящее из двух частей: качественного подтверждения образования межмолекулярных комплексов и количественной характеристики данного процесса, выражающейся в нахождении равновесной константы связывания.



*рис.1. Структуры (4-(4-(диметиламино)стирил)-6-метил)-пиримидинил-2-тиоцианата 1 (а) и кофеина (б)*

Соединение **1** представляет собой порошок ярко-желтого цвета, дающий в воде раствор желтого цвета. Раствор кофеина является бесцветным. В связи с этим в качестве экспериментального метода определения комплексообразования этих двух веществ был выбран метод спектрофотометрического титрования, в котором концентрация соединения **1** поддерживалась постоянной ( $8,0 \cdot 10^{-5}$  моль/л), а концентрация кофеина изменялась от  $1,2 \cdot 10^{-1}$  моль/л до нуля. Титрование проводилось в полистироловых кюветах с длиной оптического пути 1 см в диапазоне длин волн 350-800 нм с шагом 0,5 нм. Регистрация спектров поглощения осуществлялась с помощью двухлучевого спектрофотометра Lambda 365 (Perkin Elmer, США). Результатом эксперимента титрованием явился набор спектров поглощения (*рис.2а*) соединения **1** при различных концентрациях кофеина.



*рис.1. Спектры поглощения соединения 1 в присутствии различных концентраций кофеина (а) и соответствующая им кривая титрования (б)*

Очевидно, полоса поглощения соединения **1** по мере добавления кофеина испытывает одновременно bathochromное (на 7,5 нм) и гиперхромное смещение, что является характерным признаком образования межмолекулярных комплексов [1]. На *рис.2б* изображена кривая титрования, т.е. зависимость оптической

плотности смеси на длине волны, соответствующей максимуму поглощения соединения **1** (427,5 нм), от концентрации кофеина.

Количественная оценка комплексообразования проводилась с помощью модели 1:2 гетероассоциации [2], согласно которой соединение **1** способно образовывать комплексы с кофеином, а кофеин также может образовывать гомодимеры. Закон сохранения массы в рамках такой модели задается системой уравнений:

$$\begin{cases} x_0 = x_1 + K_h x_1 y_1 \\ y_0 = y_1 + 2K_y y_1^2 + K_h x_1 y_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $x_0, y_0$  — общие концентрации соединения **1** и кофеина,  $x_1, y_1$  — мономерные концентрации соединения **1** и кофеина соответственно,  $K_y$  — равновесная константа димеризации кофеина (равна 12,2 л/моль [2]),  $K_h$  — равновесная константа комплексообразования. Искомая константа  $K_h$  находится путем минимизации квадратичного отклонения экспериментальных точек кривой титрования от теоретических значений поглощения

$$A(y_0) = \varepsilon_m x_1 + \varepsilon_h K_h x_1 y_1, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_m, \varepsilon_h$  — коэффициент молярного поглощения соединения **1** в свободной и связанной с кофеином форме. Коэффициент  $\varepsilon_m$  рассчитывается как  $A(0) / x_0$ ,  $\varepsilon_h$  является подгоночным параметром наряду с константой  $K_h$ .

Расчетной кривой титрования, изображенной на *рис.2б* сплошной линией, соответствуют значения  $K_h = 14,7$  л/моль и  $\varepsilon_h = 18272$  л/(моль·см). Близкое к единице значение коэффициента детерминации  $R^2 = 0,9953$  позволяет заключить, что полученное значение константы, по-видимому, соответствует действительности. Кроме того, оно согласуется со значениями констант комплексообразования других известных ароматических биологически активных веществ с кофеином [3]. Таким образом, проведенный анализ показал, что соединение **1** эффективно агрегирует с кофеином, что указывает на высокую вероятность связывания его и с ДНК.

Работа выполнена в рамках субсидии Минобрнауки России на трудоустройство выпускников 2020 года на научно-исследовательские позиции в 2021 году.

Список публикаций:

[1] Кантор Ч., Шиммель П. // *Биофизическая химия*. Том 2. Москва: Мир. 1984. 496 с.

[2] Барановский С.Ф., Болотин П.А., Евстигнеев М.П., Чернышев Д.Н. // *Журн. прикл. спектр.* 2009. Т. 76. № 1. С. 143-151.

[3] Evstigneev M.P., Lantushenko A.O., Evstigneev V.P., Mykhina Yu.V., Davies D.B. // *Biophys. Chem.* 2008. V. 132. P. 148-158.



## 12 - Геофизика: земная кора, океан, атмосфера

Ефимова Милана Владимировна, 3 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Поиск гидродинамической связи между скважинами методами многопараметрической линейной регрессии и емкостно-резистивной модели**

Питюк Юлия Айратовна, к.ф.-м.н.

e-mail: [efimova.milana01@gmail.com](mailto:efimova.milana01@gmail.com) стр. 98

Корытников Антон Александрович, магистрант 2 года обучения

Октябрьский, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Влияние положения автономных приборов в скважине на показания нейтронных методов**

Антон Александрович Корытников, к.г.-м.н.

e-mail: [anton.korytnikovv@gmail.com](mailto:anton.korytnikovv@gmail.com) стр. 99

Матыцина Анастасия Романовна, 2 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Экспедиционные исследования плотности тока механического переноса на границе атмосфера-земля**

Панчишкина Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru) стр. 101

Тимошенко Геннадий Геннадьевич, 2 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Объемная активность радона-222 в приземной атмосфере и почвенном газе по результатам экспедиционных измерений**

Петрова Галина Григорьевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru) стр. 103

## Поиск гидродинамической связи между скважинами методами многопараметрической линейной регрессии и емкостно-резистивной модели

Ефимова Милана Владимировна<sup>2</sup>

Фахреева Регина Рафисовна<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ООО «РН-БашНИПИнефть», <sup>2</sup>Башкирский государственный университет

Путьок Юлия Айратовна, к.ф.-м.н.

[efimova.milana01@gmail.com](mailto:efimova.milana01@gmail.com)

На сегодняшний день актуальными остаются проблемы поиска источников обводнения, подбора оптимального режима работы скважин и автоматизации рутинных работ по поиску гидродинамической связи между скважинами. Анализ взаимовлияния скважин является одним из способов получения информации о межскважинном пространстве, а именно о состоянии коллектора, степени его неоднородности, наличии трещин и разломов.

Для установления взаимовлияния между скважинами имеются технологические методы, к которым относятся закачка трассеров, гидропрослушивание, индикаторные диаграммы. Также, математические и численные методы. Однако, особое внимание уделяется численным способам оценки взаимовлияния скважин, которые в отличии от технологических не требуют геологических и гидродинамических моделей. В результате литературного обзора мы выбрали два метода: метод многопараметрической линейной регрессии (MLR) [1] и емкостно-резистивная модель (CRMIP) [2]. Данные методы были выбраны в силу своей простоты и не привязанности к параметрам пласта. Метод MLR основан на корреляционном подходе (1) и используется для определения корреляции между динамическими данными эксплуатации нагнетательных и добывающих скважин.

$$\hat{\Phi}_j(t) = \beta_{0j} + \sum_{i=1}^{N_i} \beta_{ij} \Phi_i(t), \quad (1)$$

где  $\hat{\Phi}_j$  – давление/дебит на  $j$ -ой реагирующей скважине,  $\Phi_i$  – давление/приемистость на  $i$ -ой возмущающей скважине,  $\beta_{ij}$  – весовые коэффициенты, представляющие вероятностную оценку влияния возмущающих скважин на реагирующую,  $\beta_{0j}$  – свободный член,  $t$  – время,  $N_i$  – число возмущающих скважин.

Метод CRMIP основан на уравнении материального баланса (2) и подразумевает анализ приемистости, дебита и забойного давления добывающей скважины.

$$\tau_{ij} \frac{dq_{ij}(t)}{dt} + q_{ij}(t) = f_{ij} w_i(t) - \tau_{ij} J_{ij} \frac{dp_j(t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $w_i(t)$  – расход  $i$ -ой возмущающей скважины;  $p_j(t)$  – давление на забое  $j$ -ой реагирующей скважины;  $q_{ij}(t)$  – вклад в дебит  $j$ -ой реагирующей скважины от  $i$ -ой возмущающей. На основе этих данных и решения задачи оптимизации определяются коэффициенты взаимовлияния скважин  $f_{ij}$ , определяющие объемную долю закачанной воды, которая движется к добывающей скважине, временной параметр  $\tau_{ij}$  и коэффициенты продуктивности  $J_{ij}$ .

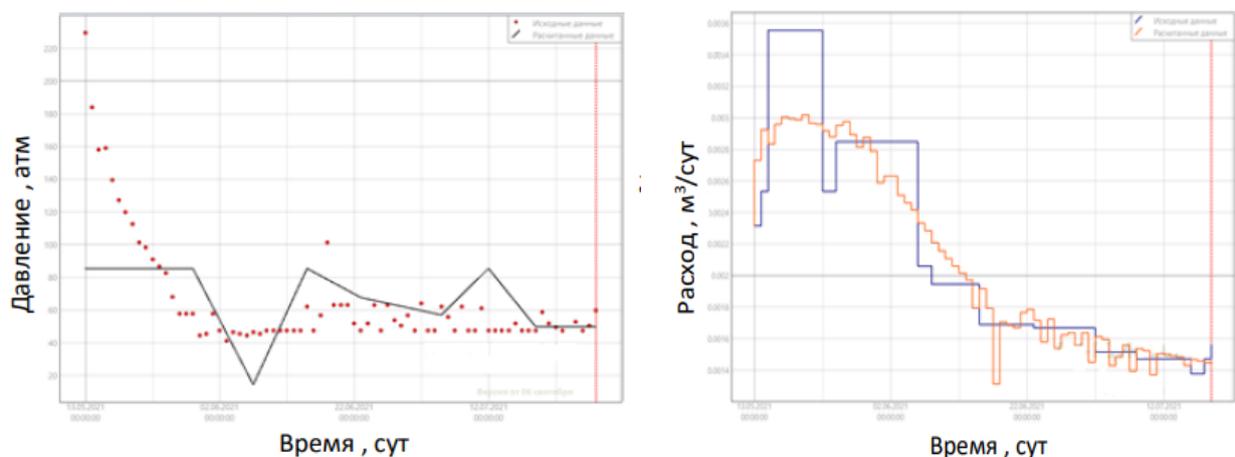
Методы MLR и CRMIP были протестированы на синтетических данных[3]. В данной работе методы были применены для оценки взаимовлияния скважин нефтяного месторождения А. Для проведения анализа взаимовлияния использовались данные добывающих скважин ХХ03, ХХ04, ХХ07, ХХ32, ХХ003 и нагнетательной скважины УУ31. Для каждой пары добывающая-нагнетательная скважины получены коэффициенты взаимовлияния (табл.1) и графики зависимостей давлений и дебита в добывающих скважинах. На основе полученных коэффициентов выявлено наличие или отсутствие взаимовлияния между парами скважин. В результате методы MLR и метод CRMIP обнаружили взаимовлияние между скважинами ХХ03 и УУ31. На рис.1 представлены результаты применения методов для данной пары скважин. Совместный анализ всех целевых скважин методом CRMIP также показал наличие связи между парой скважин ХХ03 и УУ31.

Можно заметить, что график рассчитанных показателей коррелирует с графиком исходных данных в обоих случаях. Полученные результаты хорошо согласуются с экспертной оценкой.

Таким образом, применение методов MLR и CRMIP на основе вычисленных коэффициентов позволило обнаружить гидродинамическую связь между скважинами ХХ03 и УУ31 на рассматриваемом участке месторождения.

	MLR		CRMIP			
			Попарный	Совместный		
	Нагнетательные скважины					
	YY31(Q)	YY31(P)		YY31	YY31	
Добывающие скважины	XX03(P)	0,502	-0,330	XX03	0,632	0,387
	XX03(Q)	0,466	-0,241			
	XX04(P)	0,465	0,420	XX04	0,107	0,107
	XX04(Q)	0,037	-0,096			
	XX07(P)	0,228	0,246	XX07	0,522	0,148
	XX07(Q)	-0,550	-0,652			
	XX32(P)	0,356	0,459	XX32	0,281	0,247
	XX32(Q)	-0,145	-0,122			
	X003(Q)	-0,399	-0,452	X003	0,203	0,130
X003(P)	-0,716	-0,807				

табл.1. Матрица коэффициентов взаимовлияния.



а) Сравнение динамики давления на реагирующей скважине XX03. Черная кривая – рассчитанные данные, красная – исходные данные

б) Сравнение динамики дебита на реагирующей скважине XX03. Оранжевая кривая – рассчитанные данные, синяя кривая – исходные данные

рис.1. Результат применения метода MLR (а) и CRMIP (б) для пары скважин XX03 и YY31.

Список публикаций:

- [1] Dinh A. and Tiab D., 2008. Inferring interwell connectivity from well bottomhole-pressure fluctuations in waterfloods. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*: 847-881, SPE 106881.
- [2] Holanda, R. W. d., 2015. Capacitance Resistance Model in a Control Systems Framework: a Tool for Describing and Controlling Waterflooding Reservoirs. Master's thesis, Texas A&M University, College Station, Texas, USA: 156.
- [3] Бухмастова С.В., Фахреева Р.Р., Путьок Ю.А., Давлетбаев А.Я., Азарова Т.П., Фаргер Д.В., Якунов Р.Ф. Апробация методов MLR и CRMIP при исследовании взаимовлияния скважин // *Нефтяное хозяйство*. – №1162. – 2020. – стр. 58-62.

## Влияние положения автономных приборов в скважине на показания нейтронных методов

**Корытников Антон Александрович**  
 Баширский государственный университет  
 Зараменских Николай Михайлович, к.г.-м.н.  
[anton.korytnikov@gmail.com](mailto:anton.korytnikov@gmail.com)

В процессе каротажа «на трубах» с помощью автономных модулей нет прямой связи с прибором, невозможно контролировать положение прибора в скважине. В последствии при отрыве прибора от стенки скважины увеличивается погрешность измерений. Увеличение погрешности заключается в том, что из-за

влияния скважинного флюида малый зонд прибора дает завышенные показания, по которым считают значения пористости и водородосодержания. Происходит завышение показаний из-за влияния прослойки скважинного флюида между прибором и стенкой скважины.

Для уменьшения погрешности показаний прибора в скважине был разработан алгоритм, с помощью которого вводится поправка.

$$F(K_p) = \frac{MЗ}{БЗ} * \frac{БЗв}{МЗв} = \alpha \quad (1)$$

$$F(K_p)_{нов.} = \alpha - \frac{МЗв}{МЗ} * tg_{ср} \quad (2)$$

Где:  $K_p$ - коэффициент пористости, МЗ- малый зонд, БЗ- большой зонд, МЗв и БЗв- показания малого и большого зонда в воде.

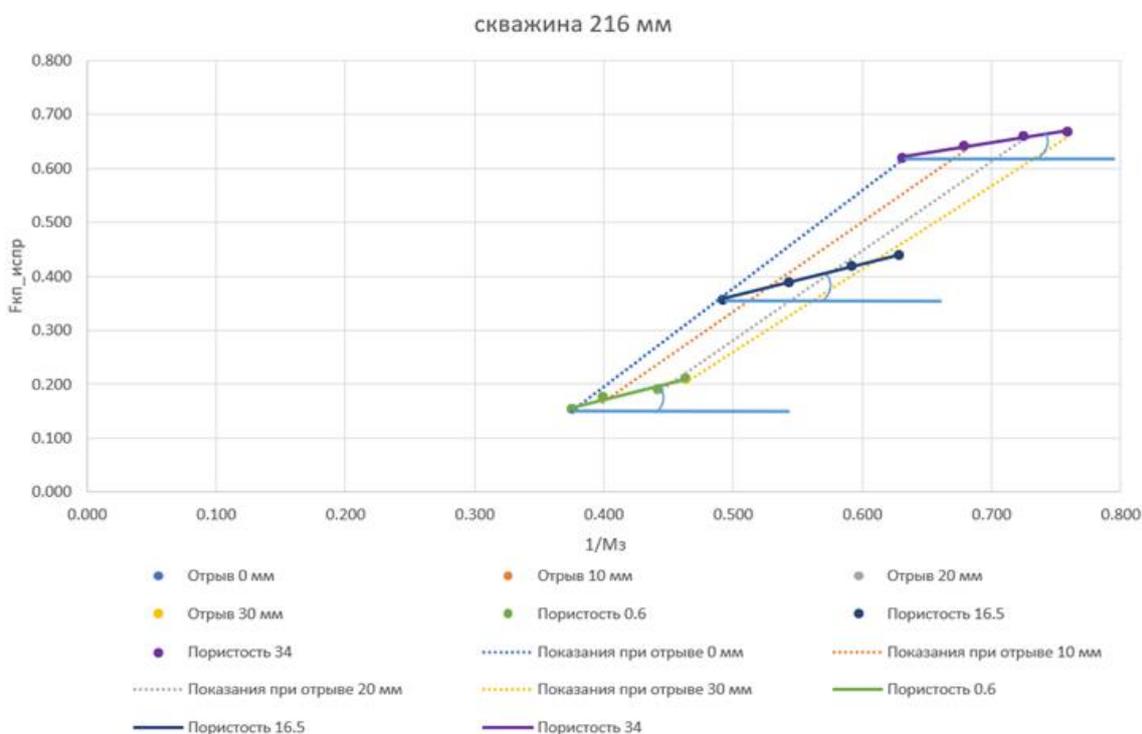


рис.1. Показания автономного прибора НК с отрывами

Рисунок демонстрирует показания автономного прибора НК в скважине с диаметром 216 миллиметров с отрывом от стенки скважины (0, 10, 20, 30мм). Зеленая линия на рисунке объединяет показания прибора напротив пласта с  $K_p$  0.6 с отрывами 0, 10, 20, 30мм. Аналогично синяя и сиреневая линии объединяют показания при  $K_p$  16.5 и 34. Пунктирные линии объединяют показания при одном из отрывов с разными  $K_p$  (например серая пунктирная линия объединяет показания  $K_p$  0.6, 16.5, 34 при отрыве 20мм).

На рисунке также демонстрируются углы отклонения, по которым берутся тангенсы (голубые горизонтальные линии показывают отклонение показаний прибора при отрыве 10, 20, 30мм от эталонных при отрыве 0мм).

Рисунок демонстрирует данные пористости полученные разными методами:

- стандартная обработка КИП – синий цвет;
- обработка с помощью алгоритма – зеленый цвет;
- обработка с учетом минерализации – красный цвет;
- исследования керна с трех глубин – черный цвет.

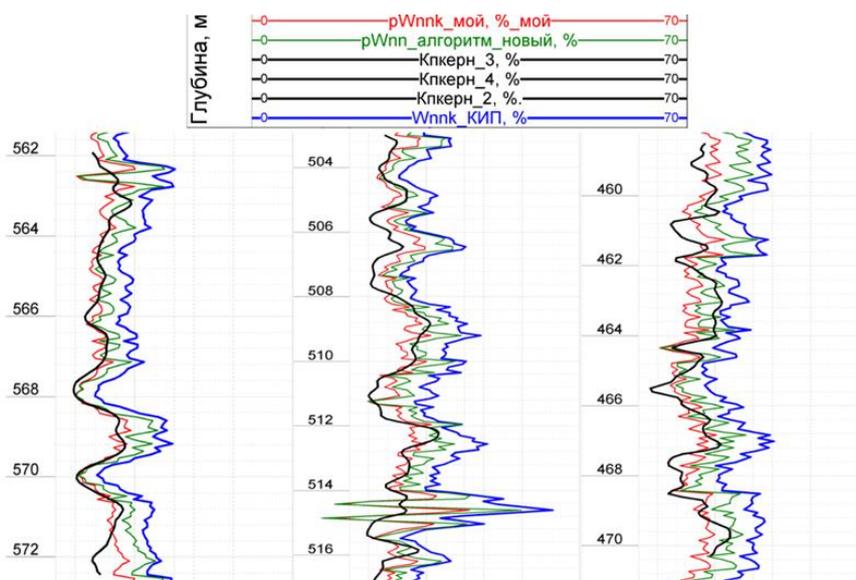


рис.2. Результат работы алгоритма в сравнении

Работа алгоритма показывает результат, который приближен к данным, полученным из керна.

Список публикаций:

- [1] Балапанов М. Х., Куватов З.Х., Корытников А.А // *The dielectric constant of the mixture is compensated cholesteric liquid crystals* // *Актуальные проблемы микро- и нанoeлектроники. г.2018, С. 237.*
- [2] Корытников А.А. // *Использование СНГК в нефтяных и газовых скважинах с целью улучшения качества скважинного материала* // *Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2021» // Тезисы докладов XII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию профессора БашГУ Фарзтдинова Миркашира Минигалиевича (г. Уфа, 6 – 9 октября 2021 г.)*
- [3] Корытников А.А., Кашипов А.И. // *Спектрометрия в нефтегазовых скважинах на примере SGK и СНГК* // *VI всероссийская молодежная научно- практическая конференция // Уфа, г.2021*

## Экспедиционные исследования плотности тока механического переноса на границе атмосфера-земля

**Матыцина Анастасия Романовна**

**Тимошенко Геннадий Геннадьевич**

**Южный федеральный университет**

**Панчишкина Ирина Николаевна, к. ф. -м.н.**

**[georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru)**

Выявление связей между атмосферно-электрическими величинами и другими физическими характеристиками в приземном слое атмосферы является сложной комплексной задачей. Учет метеорологических условий и аэрозольного состояния атмосферного воздуха при анализе экспериментальных данных, может служить источником важной дополнительной информации, способствующей более глубокому пониманию физических процессов в электродном слое атмосферы. Сложная совокупность метеорологических параметров и их значительная пространственно-временная изменчивость определяет многообразие сочетаний метеорологических условий в каждом пункте наблюдений.

В настоящей работе рассматриваются особенности переноса заряда под действием механических сил на границе атмосфера-земля на основе результатов экспериментальных исследований, полученных в летние месяцы в Ростовской области, на берегу оз. Байкал и в условиях высокогорья на плато Шаджатмаз (2100 м). В качестве исходных массивов выбраны ряды среднечасовых значений плотности тока механического переноса из атмосферы на землю и метеорологических характеристик в прилежащем к земле двухметровом слое.

Механический перенос заряда в приземной атмосфере осуществляется благодаря двум основным механизмам: конвекции и диффузии, поэтому плотность тока механического переноса в атмосфере вблизи поверхности земли  $j_{мп}$  состоит из диффузионной и конвективной составляющей:

$$j_{мп} = -D \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho v, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность объемного заряда,  $v$  – скорость вертикальных конвективных потоков  $\frac{\partial \rho}{\partial z}$  – вертикальная составляющая градиента плотности объемного заряда,  $D$  – коэффициент диффузии, который равен сумме коэффициентов турбулентной  $D_T$  и молекулярной  $D_M$  диффузии  $D = D_T + D_M$ .

Вследствие того, что на границе атмосферы и земной поверхности скорость вертикальных потоков обращается в ноль, а многие физические параметры изменяются скачком, плотность тока механического переноса не представляется возможным описать аналитически. Можно лишь предположить, что перенос заряда из атмосферы на землю под действием механических сил обусловлен, в основном, диффузионными процессами, а плотность тока механического переноса атмосфера-земля  $i_{мп}$  зависит от свойств и динамики приземного атмосферного слоя  $i_{мп} = f(\rho, v, D)$ . Средние за период значения плотности тока механического переноса из атмосферы на землю для разных пунктов наблюдений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Описательная статистика массивов плотность тока механического переноса атмосфера-земля для разных пунктов наблюдений

	Пункты наблюдений	Среднее значение, $\mu\text{A}/\text{m}^2$	Стандартное отклонение, $\mu\text{A}/\text{m}^2$	Коэффициент вариации, %	Число часовых серий
Ростовская область	Ростов-на-Дону	-0,30	0,40	133	175
	Первомайское	-0,38	0,50	132	136
	Михайловка	-0,42	0,80	190	854
	Цимлянск	-0,29	0,98	337	37
берег оз. Байкал	Б. Коты	0,52	0,25	48	158
Карачаево-Черкесия	Плато Шаджатмаз	1,08	2,99	277	62

Обращает на себя внимание тот факт, что во всех пунктах Ростовской области средние за период измерений значения плотности тока механического переноса из атмосферы на землю отрицательны. А на плато Шаджатмаз и в поселке Б.Коты, расположенном на берегу озера Байкал ток механического переноса в среднем принесил на земную поверхность положительный заряд. Знак заряда, поступающего на поверхность земли зависит от того какого знака объемный заряд находится в атмосфере и от того как изменится плотность объемного заряда с высотой (1). Объемный заряд в атмосфере образуют ионы всех подвижностей за счет разности концентраций носителей зарядов разных полярностей, однако плотность объемного заряда аэрозоля, появившегося вследствие адсорбции на нем зарядов легких ионов, в среднем на порядок больше, чем плотность объемного заряда легких ионов.

Следует отметить, что в пунктах Ростовской области, расположенных в степной засушливой зоне юга России, даже в отсутствии антропогенного загрязнения наблюдается образование аэрозолей в результате ветрового подъема частиц с поверхности почвы, особенно в дневное время, когда отмечается суточный максимум скорости ветра. На плато Шаджатмаз и на берегу озера Байкал, где условия в летний период характеризуются сравнительно низкими температурами и высокой влажностью, аэрозольная компонента представлена преимущественно конденсационными частицами. Результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о том, что по мере увеличения относительной влажности воздуха наблюдается изменение избирательности аэрозольных частиц по отношению к легким ионам разных знаков [1], что приводит к появлению объемных зарядов в атмосфере. Таким образом, на процесс переноса зарядов под действием механических сил влияют механизмы образования и зарядки аэрозолей в пункте наблюдений. Проведенные ранее исследования [2] результатов наблюдений в Цимлянске Ростовской области и на высокогорном плато Шаджатмаз с использованием однофакторного дисперсионного анализа показали, что влияние концентрации аэрозолей на вариации плотности тока механического переноса оказалось достоверным. Показатель силы влияния этого фактора, рассчитанный по методу Снедекора [3] в Цимлянске оказался равным 16%, на плато Шаджатмаз – 13%.

Анализ данных, полученных в Цимлянске показал, что при влажности меньше 40%, среднее значение плотности тока механического переноса из атмосферы на землю было отрицательным, в часы, когда влажность превышала 40%, практически все значения плотности тока оказались положительными (таблица 2). За рассматриваемый период измерений не наблюдалось значений влажности выше 60%.

Таблица 2. Средние значения плотности тока механического переноса атмосфера-земля для разных интервалов влажности в Цимлянске

Влажность	Среднее значение $i_{мп}$	Процент
$\varphi < 40\%$	-0,65 $\mu\text{A}/\text{m}^2$	отрицательных значений 72%
$40\% < \varphi < 60\%$	0,53 $\mu\text{A}/\text{m}^2$	положительных значений 95%

Таким образом, результаты полевого эксперимента показывают, что термодинамический режим приземного слоя атмосферы и механизмы образования и зарядки аэрозоля в пунктах наблюдений оказывают существенное влияние на перенос заряда на земную поверхность под действием механических сил.

Список публикаций:

[1] Смирнов В.В. // *Известия РАН. ФАО*, 2010, том 46, №3, с.321-331

[2] Панчишкина И.Н., Петрова Г.Г., Петров А.И., Егоров Е.В., Шевченко А.В. // *Ярославль: Филигрань*, 2019, С.59.

[3] Лакин Г.Ф. // *«Высшая школа»*, М., 1990, 350 с.

## Объемная активность радона-222 в приземной атмосфере и почвенном газе по результатам экспедиционных измерений

*Тимошенко Геннадий Геннадьевич*

*Матыцина Анастасия Романовна*

*Южный федеральный университет*

*Петрова Галина Григорьевна*

*[georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru)*

На протяжении ряда лет лабораторией геофизических исследований Физического факультета Южного федерального университета в сотрудничестве с Институтом физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН (ИФА РАН) проводятся комплексные экспедиции по исследованию закономерностей электрических процессов в приземной атмосфере. Одной из задач экспедиций является определение значимых для электричества нижней атмосферы факторов, исследование процессов формирования их вариаций и установление количественных соотношений с ними атмосферно-электрических характеристик.

Как показывают исследования, важнейшим фактором, определяющим ионизационный режим приземного слоя, является природный газ радон, главным образом, его изотоп радон-222. Радон-222  $\alpha$ -радиоактивен, что определяет его большую ионизирующую способность. Образуется радон-222 в недрах в результате цепочки радиоактивных распадов урана-238 и в атмосферу поступает из грунта через естественные поры и трещины, из-за чего поток радиоактивных газов в значительной степени зависит от свойств и состояния подстилающей поверхности, от ее газопроницаемости. Изотоп радон-222 имеет период полураспада 3,8 суток, что позволяет ему распространяться в атмосфере на значительные расстояния от земной поверхности и ионизировать атмосферу изнутри. Поэтому для ионизации атмосферы он имеет особенно важное значение, чем и продиктован интерес к измерению активности радона-222 при организации экспедиционных исследований.

Для измерений объемной активности (ОА) радона-222 в атмосфере использовался радон-монитор «AlphaGUARD PQ2000 PRO» в режиме 10-минутного осреднения. В почвенном газе объемная активность радона определялась с использованием внешних устройств: датчика почвенного газа «AlphaGUARD Soil GasUnit» и электронного насоса «AlphaPUMP». На основании измерений объемной активности  $^{222}\text{Rn}$  на глубине 0,1;0,6;0,9 метра оценивалась плотность потока радона (ППР) из почвы в атмосферу. На высокогорных станциях в силу особенностей грунта измерить содержание радона в почвенном газе на глубине 0,9 и даже 0,6 метра не всегда представляется возможным. В этом случае ППР определялась с помощью накопительной камеры. В этом методе измерение плотности потока  $^{222}\text{Rn}$  с поверхности грунта определяется по количеству  $^{222}\text{Rn}$ , накопленного в пробоотборнике или в измерительной камере за счет поступления с поверхности грунта известной площади за известное время.

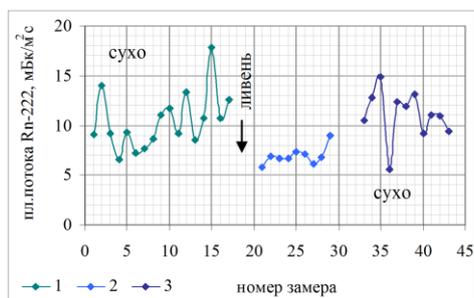


рис. 1. Плотность потока радона-222 из почвы в атмосферу на плато Шаджатмаз (КВНС ИФА) в зависимости от осадков: 1)4.08.21;

В работе анализировались результаты экспедиционных измерений на Кисловодской высокогорной научной станции Института физики атмосферы им.А.М.Обухова (ИФА) РАН, расположенной на плато Шаджатмаз (2100 м) в летние месяцы 2018-2021 г.г. в сравнении с результатами экспедиций (июль-август) в пунктах Ростовской области (РО) в степной зоне: на Цимлянкой научной станции ИФА РАН в период 2014-2017 и в пунктах Кашарского района РО в предыдущий период.

Оценка плотности потока радона-222 из почвы в атмосферу для КВНС дала сравнительно низкие значения ППР. Например, в августе 2019 ППР на плато Шаджатмаз в среднем равнялась 14,3 мБк/м<sup>2</sup>с, а в августе 2021 всего 9,8 мБк/м<sup>2</sup>с. Для Цимлянска в 2017 ППР

составила, соответственно, 21,2 мБк/м<sup>3</sup>, а для Талловерова Кашарского района РО в 2008 28 мБк/м<sup>3</sup>. При этом объемная активность радона-222 в грунте на высокогорной станции на глубине 0,6 м имеет близкие со степными пунктами значения. Относительно малый по сравнению с пунктами Ростовской области поток радона из почвы на высокогорном плато обусловлен, возможно, пониженной газопроницаемостью грунта, обусловленной большим количеством обильных осадков. Типичной для вариаций ППР можно считать ситуацию, представленную на рисунке 1: сильный дождь с градом во второй половине дня 4.08.21 способствовал ослаблению потока радона 5.08.21 и последующему восстановлению значений ППР в условиях сухой погоды.

Содержание радона в атмосферном воздухе, безусловно, определяется потоком радиоактивного газа из почвы. Но помимо этого объемная активность (ОА) радона-222 в приземной атмосфере зависит от ее динамики. Влияние ветрового режима на ОА радона вблизи земной поверхности можно видеть по результатам физико-статистического анализа экспедиционных данных, полученных в высокогорном и степном пунктах наблюдений (рис. 2).

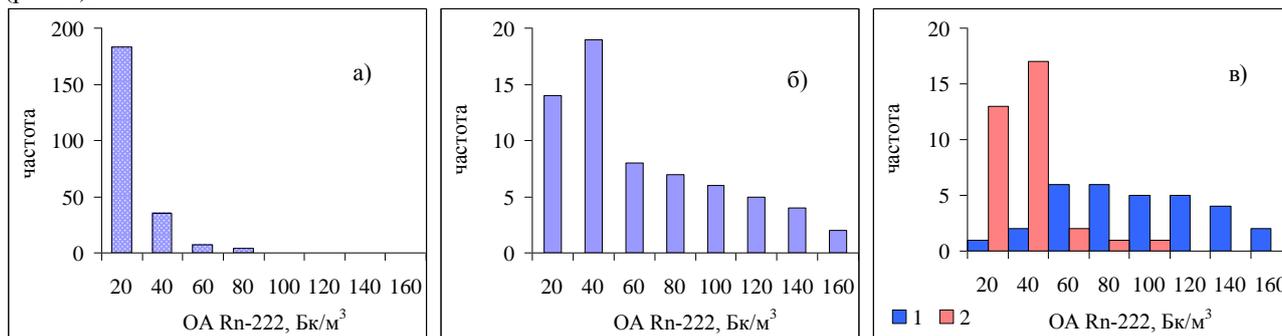


рис. 2. Эмпирические распределения значений объемной активности радона-222 на уровне  $h=0,05$  м: а) КВНС ИФА, август 2019, 230 часов; б) Талловеров Кашарского района РО, август 2008, 65 часов; в) Талловеров Кашарского района РО, август 2008, при разных скоростях ветра  $U_2$  на высоте 2 м: 1-  $U_2 < 0,5$  м/с, 31 час; 2-  $U_2 > 1$  м/с, 34 часа.

Рассмотрение диаграмм эмпирических распределений частоты появления различных значений ОА радона в исследуемых пунктах позволяет заметить наличие большого числа замеров с высокими значениями ОА радона в степном Талловерове (рис.2б). Дополнительный анализ с учетом скорости ветра показывает, что при малых скоростях ветра (рис.2в, диаграмма 1,  $< 0,5$  м/с, 48 % замеров, 31 час) чаще наблюдаются большие значения ОА радона. Выборка замеров с повышенной скоростью ветра (рис.2в, диаграмма 2,  $> 1$  м/с, 52 % замеров, 34 часа) обнаруживает, что в таких условиях чаще встречаются пониженные значения ОА радона. Исследование ветрового режима высокогорной станции ИФА РАН показало, что из 230 часов замеров скорость ветра меньше 0,5 м/с наблюдалась в 1 % случаев (для 3 часов замеров), а превышала 1 м/с в 91 % замеров. В итоге ветреной погоды на плато содержание радона в приземном слое преимущественно невелико, что определяет особенности ионизационного режима атмосферы. Аналогичная ситуация имеет место и на Цимлянкой научной станции ИФА РАН, где скорость ветра менее 0,5 м/с в период экспедиции 2017 не наблюдалась ни разу, а замеры со скоростью, большей 1 м/с, составили 100 %. Результатом является тот факт, что средняя ОА радона-222 в атмосфере на высоте 5 см в Талловерове в 2008 году равнялась 57 Бк/м<sup>3</sup>, тогда как в Цимлянске в 2017 - 15,5 Бк/м<sup>3</sup>, а на КВНС ИФА - 15,3 Бк/м<sup>3</sup>.

## 15 - Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы. Инженерная механика

Габышев Дмитрий Николаевич, н.с.

Тюмень, Тюменский государственный университет, Институт экологической и сельскохозяйственной биологии

**Колебания жидких гидрометеоров при движении с терминальной скоростью**

e-mail: [gabyshev-dmitrij@rambler.ru](mailto:gabyshev-dmitrij@rambler.ru) стр. 106

Ильин Владимир Алексеевич, доцент

Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, физический

**Режимы электроконвекции в маломодовой модели при низких и высоких частотах электрического поля**

e-mail: [ilin1@psu.ru](mailto:ilin1@psu.ru) стр. 107

Мухутдинова Айгуль Айратовна, аспирант 1 года обучения

Уфа, Институт механики Уфимского ФИЦ РАН, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Математическое моделирование процесса гравитационного осаждения полидисперсной эмульсии**

Киреев Виктор Николаевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [muhutdinova18@gmail.com](mailto:muhutdinova18@gmail.com) стр. 109

Фазлетдинов Спартак Уралович, 4 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Численное моделирование зацементации остаточной нефти в модели порового дублета**

Питюк Юлия Айратовна, к.ф.-м.н.

e-mail: [spartak.fazlet@gmail.com](mailto:spartak.fazlet@gmail.com) стр. 110

Фахретдинова Алсу Леонидовна, 3 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Численное моделирование сортировки частиц по размеру в областях с детерминированным боковым смещением**

Солнышкина Ольга Александровна, к.ф.-м.н.

e-mail: [A.L.Fakhretdinova@yandex.ru](mailto:A.L.Fakhretdinova@yandex.ru) стр. 111

Хисамов Артур Альфирович, аспирант 2 года обучения

Уфа, Башкирский государственный университет, ООО РН БашНИПИнефть, Физико-технический институт

**Моделирование неустановившейся фильтрации в системе пласт - трещина ГРП**

Хабибуллин Ильдус Лутфурахманович, д.ф.-м.н.

e-mail: [khisamovartur@list.ru](mailto:khisamovartur@list.ru) стр. 113

Шахмаев Ришат Рафикович, аспирант 1 года обучения

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

**Электрогидродинамические процессы в водном мостике**

Шайхитдинов Рамиль Зайниевич

e-mail: [arteban2014@gmail.com](mailto:arteban2014@gmail.com) стр. 114

## Колебания жидких гидрометеоров при движении с терминальной скоростью

*Габышев Дмитрий Николаевич*

*Сзакалл Миклош, Шербаков Дмитрий Васильевич, Федорец Александр Анатольевич, Дьячков Сергей Михайлович*

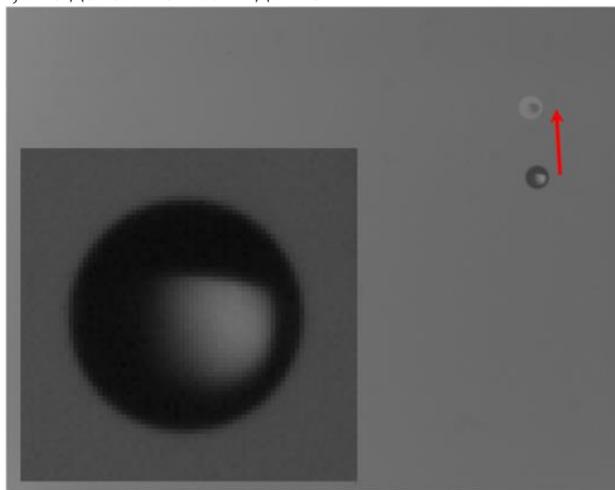
*Тюменский государственный университет*

*[gabyshev-dmitrij@rambler.ru](mailto:gabyshev-dmitrij@rambler.ru)*

Мельчайшие капли воды в земной атмосфере с числом Бонда менее единицы особенно чувствительны к сопротивлению воздуха. При этом такие капли встречаются повсеместно: образуются в больших количествах над океанами на естественных кристаллах морской соли и над индустриальными центрами на частицах антропогенных аэрозолей; формируют явление, известное как сухой дождь; переносят бактерии и споры вторичными микрокаплями при бомбардировке почвы крупными каплями дождя; обуславливают «запах дождя» при разнесении элементов почвы по аналогичному механизму; срываются с гидрофобных поверхностей листьев растений при капельной конденсации; генерируются человеческим организмом при чихании и кашле и т.д. Два основных последствия состоят в нежелательной облачности, снижающей инсоляцию и видимость объектов, а также в возможности распространения болезнетворных бактерий и вирусов. Отсюда важно как можно лучше понимать динамику микрокапель в атмосферном воздухе.

Для изучения поведения субмикронных капель воды диаметром от 400 до 700 мкм (который соответствует виду осадков, называемому моросью) была использована вертикальная аэродинамическая труба, расположенная в Университете Майнца, Германия [1]. В ней капли при температуре 21 °С левитировали в направленном вертикально вверх воздушном потоке с терминальной скоростью от 1.67 до 3.06 м/с, а число Рейнольдса в наблюдениях варьировалась, соответственно, от 46 до 162. Положение капель в пространстве фиксировалось скоростной видеокамерой (Motion ProX, Redlake, Inc.) с частотой 1000 fps (рис. 1). Данные наблюдений через облачный сервис отправлялись в Тюменский государственный университет, где с помощью специально написанной компьютерной программы (интерфейс C#, открытая библиотека OpenCV на C++) удалось распознать 8 из 14 видеозаписей: изображение левитирующей капли иногда было слишком размытым, так как та выходила из фокуса камеры слишком далеко. Тем не менее, даже такая небольшая выборка позволила получить некоторые предварительные выводы.

Капли остаются сферическими во все время наблюдений из-за поверхностного натяжения (исследование Рэлеевских осцилляций формы приведено в [2]). Координаты капли в пространстве — горизонтальная  $x$  и вертикальная  $y$ , соответственно, поперек и вдоль набегающего потока — анализировались с помощью быстрого дискретного преобразования Фурье. Точность анализа ограничивалась пикселизацией изображения (рис. 1), поэтому значимыми могли считаться только те пики на спектрах, которые превосходили своей высотой величину одного пикселя (которой соответствовало разрешение на уровне 12 мкм). По итогу в каждом наблюдении были обнаружены преимущественно одиночные пики, соответствующие частотам от 11.76 до 50.98 Гц с погрешностью  $\pm 1.96$  Гц, без выраженной зависимости от числа Рейнольдса. Амплитуда вертикальных колебаний оказалась неожиданно большой — дюжина и более пикселей, в то время как горизонтальные колебания совершались с амплитудой лишь несколько единиц пикселей. Присутствие вертикальных колебаний означает, что капля движется вдоль потока небольшими, но все же, рывками вблизи своей терминальной скорости, что довольно неожиданно.



*рис. 1. Смещение капли диаметром 609 мкм в поле зрения видеокамеры за 0.1 с (по красной стрелке; негатив наложен на позитив) и типичная анализируемая капля с пикселизацией (увеличенный фрагмент).*

Далее к данным о положении капли в пространстве было применено преобразование Гильберта. Анализ устойчивости мгновенной частоты показал нам, что в пределах исследуемых экспериментальных диапазонов частота горизонтальных колебаний все же немного в среднем растет с увеличением числа Рейнольдса. Однако частота вертикальных колебаний снова не зависела от числа Рейнольдса и в среднем была почти постоянной, что, очевидно, наблюдалось из-за статистически довольно малой совокупности наблюдений.

Таким образом, капли дождя, выпадающие на землю, а также все иные микрокапли, образуемые вблизи земной поверхности в результате описанных в начале процессов, совершают колебания. Данные колебания обусловлены потоком среды, обтекающей капли, и именуется в англоязычной литературе “vortex- and flow-induced vibrations”. Полученные нами характерные значения частот этих колебаний составляют несколько десятков герц с амплитудой в десятки и даже более сотни микрометров. Такая прибавка к поступательному движению вдоль в среднем гладкой траектории приводит к тому, что движение мельчайших капель является неравномерным даже при достижении терминальной скорости. Это достаточно нетривиальный и до сих пор не встречающийся в литературе вывод. По результатам исследования подготовлена рукопись, находящаяся на этапе рецензирования [3]. На будущее требуется радикально увеличить количество проб наблюдений, чтобы преодолеть статистические ограничения и более надежно выяснить зависимость частоты колебаний капли от ее размера и числа Рейнольдса.

Исследование было выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (МК-332.2022.1.2) и Министерства науки и высшего образования РФ (AAAA-A20-120051490005-9).

Список публикаций:

- [1] Diehl K., Mitra S. K., Szakáll M., Blohn N., Borrmann S., and Pruppacher H. R. *The Mainz Vertical Wind Tunnel Facility — a Review of 25 Years of Laboratory Experiments on Cloud Physics and Chemistry // Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments (ed. by J.D. Pereira), Nova Science Publ., New York, 2011. Pp. 69–92.*
- [2] Szakáll M., Mitra S. K., Diehl K., Borrmann S. // *Atmos. Res.* 2010. V. 97. No. 4. P. 416.
- [3] Gabyshev D. N., Szakáll M., Shcherbakov D. V., Fedorets A. A., Dyachkov S.M. *Oscillatory Signatures in the Raindrop Motion with a Terminal Velocity Relative to the Air Medium (на рецензии).*

## **Режимы электроконвекции в маломодовой модели при низких и высоких частотах электрического поля**

**Ильин Владимир Алексеевич**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

[ilin1@psu.ru](mailto:ilin1@psu.ru)

Движение слабопроводящих жидкостей в электрическом поле привлекает внимание тем, что представляет собой способ прямого преобразования энергии электрического поля в энергию движения жидкой среды [1–3]. Поведение гидродинамических систем в электрическом поле имеет ряд особенностей, связанных с характером возникновения заряда в жидкости и взаимодействием его с внешним полем. Электрическое поле может привести к резонансным явлениям, связанным с резким понижением порога конвекции, усилением или ослаблением её интенсивности. С практической точки зрения знание законов действия электрического поля на конвективные течения актуально в связи с проблемой эффективного управления конвекцией, тепло- и массопереносом в различных технологических ситуациях, в частности, в электрогидродинамических насосах.

Основоположником электрогидродинамики в нашей стране принято считать Г. А. Остроумова [1]. На сегодняшний день вопросами электрогидродинамики занимается множество исследователей. Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ в этой области вплоть до настоящего времени объяснение электрогидродинамических эффектов недостаточно изучено, что порождает необходимость их дальнейшего изучения [3]. Непредсказуемость этих эффектов обусловлена нелинейным и сложным характером физико-химических процессов, что вызывает трудности их исследования.

В настоящей работе рассматривается действие электрокондуктивного механизма зарядообразования, вызванного зависимостью электропроводности жидкости от температуры. Считается, что границы конденсатора идеально тепло- и электропроводны, и нагреты до разной температуры. При рассмотрении поведения слабопроводящей жидкости в электрическом поле использовалось электрогидродинамическое приближение, в котором магнитные эффекты пренебрежимо малы по сравнению с электрическими.

В работе [4] получена восьмимодовая модель электроконвекции слабопроводящей жидкости, находящейся в переменном электрическом поле горизонтального слоя со свободными граничными условиями. В случае, когда время релаксации заряда много меньше характерного гидродинамического времени (заряд

мгновенно рассасывается в жидкости), получается пятимодовая модель электроконвекции. Настоящая работа является продолжением исследований [4].

Параметры жидкости при исследовании случая невесомости выбраны следующие [4]:  $Pr = 100$ ; волновое число  $k = 0.962$ , соответствующее минимуму нейтральной кривой, даёт значения геометрических параметров:  $b = 2.077$ ,  $d = 2.56$ . Система уравнений решалась численно методом Рунге-Кутты с постоянными начальными условиями или методом продолжения по параметру для различных значений электрического параметра  $e$  и частоты электрического поля  $\nu$ .

Первая часть исследования проведена для низких частот электрического поля. Вначале вычисления были проведены с постоянными начальными условиями. Например, при  $\nu = 0.05$  ниже критического значения электрического числа жидкость находится в равновесии, а при  $e = 67.81$  колебательным образом возникает конвекция и устанавливается периодический режим движения жидкости. Колебания состоят из отдельных «всплесков». Все частоты Фурье-спектра являются комбинацией внешней частоты и могут быть обобщены формулой:  $(2n+1)\nu$ , где  $n$  – целое число. Т. е. в спектре содержится частота внешнего поля и её нечётные гармоники. Это синхронные колебания. С ростом электрического параметра амплитуда синхронного режима растёт, затем он исчезает и устанавливается равновесие. При  $e = 69.38$  возникает синхронный режим второго типа, в его спектре содержатся чётные гармоники внешней частоты:  $2n\nu$ . Затем в некотором интервале параметров существует периодический режим, в спектре которого присутствует частота, равная половине внешней частоты, и её нечётные гармоники – это субгармонический режим. Вычисления с постоянными начальными условиями показали, что этот режим переходит в синхронный режим 2 типа.

При дальнейшем увеличении электрического параметра происходит бифуркация удвоения периода – возникает частота в два раза меньше, затем происходит ещё одно удвоение и так происходит до тех пор, пока не возникнет хаос. Это сценарий Фейгенбаума – переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. При  $e = 69.87$  происходит переход к хаосу, при котором спектр Фурье становится сплошным.

После расчётов методом продолжения по параметру были обнаружены гистерезисные переходы между тремя режимами. Оказалось, что первый синхронный режим продолжает существовать при больших значениях параметра  $e$ . Затем он переходит к хаотическому режиму через перемежаемость.

В интервале параметров электрического числа от 67.81 до 68.58 существует только 1 режим, от 68.59 до 69.37 конкурируют 1 режим и равновесие, от 69.38 до 69.56 сосуществуют режим 1 и 2. В интервале от 69.57 до 69.61 конкурируют 3 режима: два синхронных (1 и 2 режима) и один субгармонический (3 режим). Переход к хаосу в 3 субгармоническом режиме происходит при  $e = 69.607$  по сценарию Фейгенбаума. В интервале от 69.62 до 69.94 конкурируют 1 и 2 синхронные режимы. При 69.95 режим 2 переходит в режим 1.

Вторая часть исследования проведена для относительно высоких частот электрического поля. В этом случае картина поведения меняется. При расчётах с разными частотами были обнаружены различные области с субгармоническим поведением. Подробнее была исследована область, в которой частоты подчиняются закономерности:  $\nu_n = \nu_0(2n-1)/2$ , где  $n$  – целое число. Т. е. в спектре содержится частота равная половине внешней частоты и её высшие гармоники.

При частоте, например,  $\nu = 5$  на границе устойчивости конвекция возникает квазипериодическим образом, затем квазипериодический режим колебаний сменяется субгармоническим режимом колебаний, который сменяется квазипериодическим режимом, а затем возникает хаос через квазипериодичность. При другой частоте при переходе из субгармонических колебаний хаос возникает через перемежаемость.

Список публикаций:

- [1] Остроумов Г. А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. М.: Физматгиз. 1972. 292 с.
- [2] Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
- [3] Жакин А. И. *Электрогидродинамика*// УФН. 2012. Том 182, №5. С. 495–520.
- [4] Картавых Н. Н., Смородин Б. Л., Ильин В. А. *Параметрическая электроконвекция слабопроводящей жидкости в горизонтальном плоском конденсаторе*// Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. Т. 148, вып. 1 (7). С. 178–189.

## Математическое моделирование процесса гравитационного осаждения полидисперсной эмульсии

**Мухутдинова Айгуль Айратовна**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН,*

*Башкирский государственный университет*

*Киреев Виктор Николаевич, к.ф.-м.н.*

[muhutdinova18@gmail.com](mailto:muhutdinova18@gmail.com)

В настоящее время эмульсии встречаются во многих отраслях промышленности. Например, водонефтяные эмульсии, которые образуются самопроизвольно в процессе добычи нефти [1]. Вследствие экономических и эксплуатационных причин нефтяные эмульсии необходимо отделять друг от друга, для извлечения как водной, так и (нефтяной) масляной фазы. Для разработки более эффективного оборудования по обработке эмульсий важно хорошо понимать факторы, влияющие на образование и стабильность эмульсии. Адекватное понимание факторов и механизмов, влияющих на размер капель, стабильность и осаждение, все еще требует новых разработок, исследований и открытий. Это показывает, как важно изучать и улучшать методы разрушения эмульсий. Для нахождения решения рассматриваемых задач большое значение имеют физико-химические свойства о природе дисперсных систем и поверхностных явлений происходящих в них.

В работе рассматривается процесс гравитационного осаждения обратных монодисперсных и полидисперсных эмульсий типа вода в масле. Математическая модель состоит из уравнения неразрывности и уравнений Навье – Стокса, в которых учитывается сила поверхностного натяжения на поверхности капель [2], уравнения переноса.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{u} &= 0, \\ \rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) &= -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} + \vec{F}_{st}, \\ \vec{F}_{st} &= \sigma k \nabla \alpha, \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \alpha &= 0 \end{aligned}$$

где  $p$  - давление,  $\rho$  - плотность жидкости,  $u$  - вектор скорости жидкости,  $\alpha$  - значение фазы,  $\mu$  - динамическая вязкость,  $g$  - ускорение свободного падения,  $k$  - кривизна поверхности.

Для численного решения уравнений математической модели используется открытая интегрируемая платформа OpenFOAM [3]. Метод Volume of fluid method позволяет отслеживать форму и положение поверхности в целом.

В результате численного моделирования обнаружено, что при концентрации дисперсной фазы меньше 2% время полного расслоения монодисперсных и полидисперсных эмульсий с каплями одинакового диаметра практически одинаково. Под диаметром капель в случае полидисперсной эмульсии понимается среднеобъемный диаметр капель. При больших концентрациях дисперсной фазы полидисперсная эмульсия расслаивается медленнее, чем соответствующая монодисперсная (Рис. 1). Из Рис. 1 также видно, что для крупнодисперсных эмульсий (диаметр капель 800 мкм) наибольшее время расслоения наблюдается для пятипроцентных эмульсий. При дальнейшем увеличении концентрации интенсифицируется процесс коалесценции капель и время расслоения обоих типов эмульсий уменьшается.

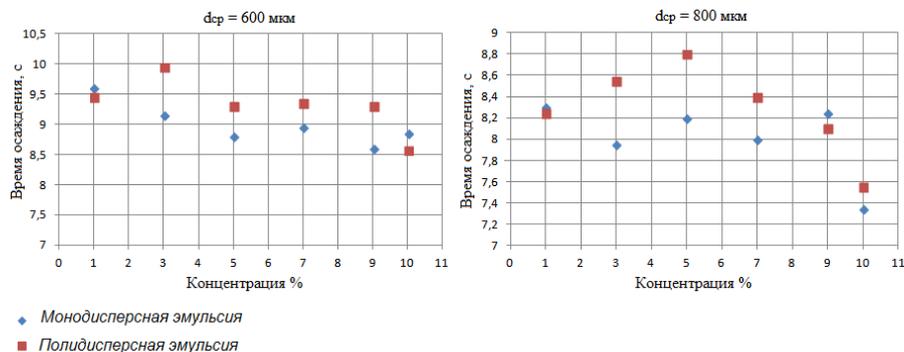


рис. 1. Зависимость времени осаждения от концентрации эмульсии и диаметра капель

Список публикаций:

- [1] Crabtree M. Eslinger D. Fletcher P. Miller M. Johnson A. King G. *Fighting Scale // Oilfield*. 1999. P. 15  
[2] Левич В.Г. *Физико-химическая гидродинамика*. М.: Институт компьютерных исследований, 2016. – 708 с.  
[3] *Openfoam programmer's guide*. <http://www.foamcf.org/Nabla/guides/ProgrammersGuide.html>, 2007.

## Численное моделирование защемления остаточной нефти в модели порового дублета

Фазлетдинов Спартак Уралович

Башкирский государственный университет

Питюк Юлия Айратовна

[spartak.fazlet@gmail.com](mailto:spartak.fazlet@gmail.com)

Как известно, вытеснение из пористой среды одной фазы другой несмешивающейся фазой происходит под действием капиллярных и вязких сил. Соотношение этих сил определяет мобильность остаточной нефти в сети поровых каналов. Многие авторы использовали модель порового дублета для объяснения захвата остаточной нефти и распределения жидкости в сети порового пространства [1-3]. Практическое применение результатов этих исследований включает определение относительной проницаемости коллектора, оценку параметров заводнения для эффективного вытеснения изначально связанной нефти и мобилизацию захваченной остаточной нефти в гидрофильных коллекторах.

Данная работа посвящена численному исследованию эффекта захвата остаточной нефти в модели порового дублета. Для численного моделирования использовался пакет OpenFOAM с многомасштабным решателем `hybridPorousInterFoam` [4]. Суть многомасштабности решателя заключается в том, что математическая модель включает уравнение Навье-Стокса для описания многофазного течения в микроканалах пористой среды и уравнение Дарси для описания многофазной фильтрации в пористых областях между микроканалами. Данные области определяются заданием пористости  $\varphi$  в расчетных ячейках, так, для микроканала задается  $\varphi = 1$ , для матрицы пористой среды определяется  $0 < \varphi < 1$ . Такой подход позволяет моделировать многофазную фильтрацию в моделях цифрового ядра, включая образцы двойной пористости.

Рассматривалась двухфазная фильтрация в модели порового дублета [5]. На *рис.1* представлена 2D геометрия порового дублета и дискретизация расчетной области. Общая длина дублета  $L = 2L_1 + L_2 = 1480$  мкм, длина отрезков  $L_1 = 300$  мкм,  $L_2 = 880$  мкм, ширина входного и выходного каналов  $w = 180$  мкм, размеры ответвленных каналов в центральной части  $w_1, w_2$  варьировались в отношении 1:2, 1:3 и 1:4 (*рис.1,б*). Пористость внутренней части порового дублета задавалась равной 1, на боковых и внутренних границах канала задавались условие прилипания на скорость и условие симметрии на давление. Скорость на входном сечении канала задавалась постоянной и равной  $v = 0.0093$  м/с, на выходном сечении канала поддерживалось постоянное давление.

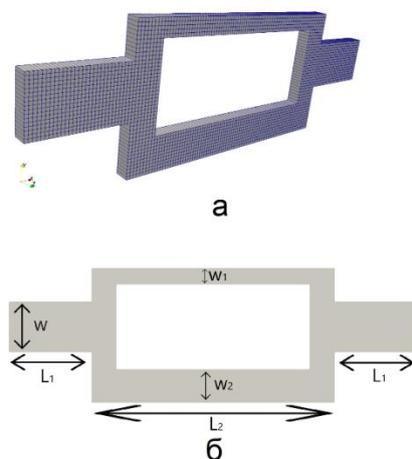


рис.1. Геометрия (б) и дискретизация расчетной области (а) модели порового дублета.

Изначально модель была заполнена нефтью (плотность  $\rho_o = 800$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu_o = 60$  мПа·с), которая вытеснялась водой ( $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_w = 1$  мПа·с). На *рис. 2* представлены результаты численного моделирования защемления нефти в канале меньшей ширины для соотношения ширины каналов

$w_1/w_2$  равной  $1/2$  (рис.2(а)) и  $1/4$  (рис.2(б)). Из рисунка видно, что при уменьшении соотношения размеров поровых каналов дублета большее количество вытесняемой жидкости остается заблокированной в более узком канале. Это связано с увеличением влияния капиллярных сил в узком канале.

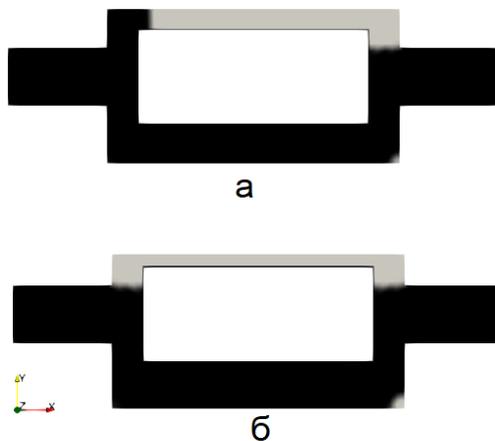


рис.2. Вытеснение нефти (серый цвет) водой (черный цвет) в поровом дублете для  $w_1/w_2 = 1/2$  (а) и  $w_1/w_2 = 1/4$  (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-79-10212.

Список публикаций:

- [1] Moore, T. F., and Slobod, R. L. // *Dependence of Residual Oil Mobilization on Wetting and Roughness*, *Prod. Monthly* 20, 20 (1956).
- [2] Rose, W., and Witherspoon, P. A. // *Trapping oil in a pore doublet*, *Prod. Monthly* 21, 32 (1956).
- [3] Stegemeier, G. L. // *Relationship of trapped oil saturation to petrophysical properties of porous media*, SPE 4754, presented at the SPE-AIME Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, OK, April 22-24, 1974
- [4] Francisco J. Carrillo, Ian C. Bourg, Cyprien Soulaïne // *Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach*, *Journal of Computational Physics: X* (Volume 8, September 2020),
- [5] Ehrlich, R., and Crane, F. E. // *The effect of pore-structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: Pore-level modeling*, *Soc. Pet. Eng. J.* 9,221 (1969).

## **Численное моделирование сортировки частиц по размеру в областях с детерминированным боковым смещением**

**Фахретдинова Алсу Леонидовна**

**Киселева Анна Александровна**

**Башкирский государственный университет**

*Солнышкина Ольга Александровна, к.ф.-м.н.*

[A.L.Fakhretdinova@yandex.ru](mailto:A.L.Fakhretdinova@yandex.ru)

Микрофлюидика – технология, с помощью которой возможны манипуляции с жидкостями на микроуровне, где такие явления, как диффузия, сопротивление жидкости и ламинарный поток, могут влиять на производительность микрофлюидных систем [1]. С помощью микрофлюидных платформ возможно выделение, фракционирование и очистка клеток. В области сортировки частиц и клеток микрофлюидика может предложить точные и высокопроизводительные методы, которые сопоставимы с обычными методами. Их можно классифицировать как активные и пассивные сортировки. Активные методы основаны на внешних силовых полях, таких как акустические или магнитные, в то время как пассивные методы полагаются только на геометрию канала и присущие гидродинамические силы для функциональности.

В данной работе будет рассматриваться одна из разновидностей пассивных методов - детерминированное боковое смещение (DLD). Детерминированное боковое смещение является мощным механизмом для высокоточной непрерывной сортировки по размеру, оно полагается только на геометрию канала и присущие гидродинамические силы. Устройство состоит из массивов столбов, через которые частицы меньшего, чем критический радиус,  $R_k$ , движутся вместе с потоком (слева на рис. 1 поток огибает столб и ограничена пунктирными линиями), а частицы большего, чем критический радиус, движутся в направлении, определяемом устройством. Для твердых сферических частиц работа устройства проста, однако в реальности

частицы могут являться мягкими и несферическими, и их деформируемость и форма влияют на траектории частиц в устройствах DLD. Критический радиус,  $R_k$ , в свою очередь, зависит от геометрии массива, а эффективный размер несферической частицы,  $R_{эфф}$ , зависит от ее ориентации при прохождении между двумя столбами. В [3] изучалось влияние изменения доли сдвига и зазора на критический размер частиц.

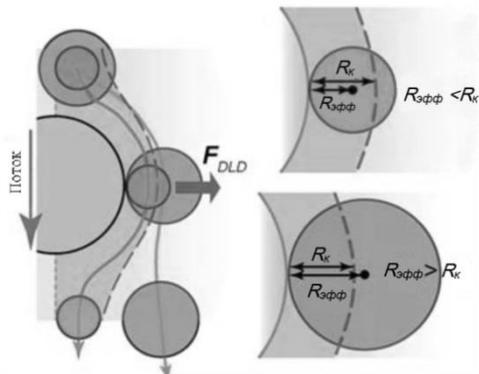


рис.1. Механизмы разделения частиц в структурах DLD [2].

Примерами применения DLD являются фракционирование компонентов крови, выделение раковых клеток из клеток крови, отделение паразитов, выделение внеклеточных везикул, сортировка на основе деформируемости в эритроцитах и тромбоцитах. Эти возможности позволяют нам работать с широким спектром приложений DLD. Так, например, в [4] использовалась модель DLD с открытым каналом и бумажного капиллярного насоса для выделения деформируемых раковых клеток.

Данная работа посвящена численному исследованию особенностей сортировки деформируемых частиц в потоке вязкой жидкости в микроканалах с DLD. Динамика системы описывается уравнениями Стокса. Для численного моделирования используется метод граничных элементов, суть которого состоит в преобразовании дифференциального уравнения в частных производных, описывающее поведение неизвестной функции внутри и на границе области, в интегральное уравнение, связывающее только граничные значения, и найти численное решение этого уравнения.

В рамках данного исследования проведены расчеты течения вязкой жидкости в системе детерминированного бокового смещения с использованием ускоренного метода граничных элементов. Варьировалась форма элементов, составляющих DLD, их пространственное расположение. Рассмотрены случаи столбиков круглого и шестиугольного поперечного сечения. Получены соответствующие картины течений, распределение продольной и поперечной скоростей при изменении угла воздействия потока (рис. 2).

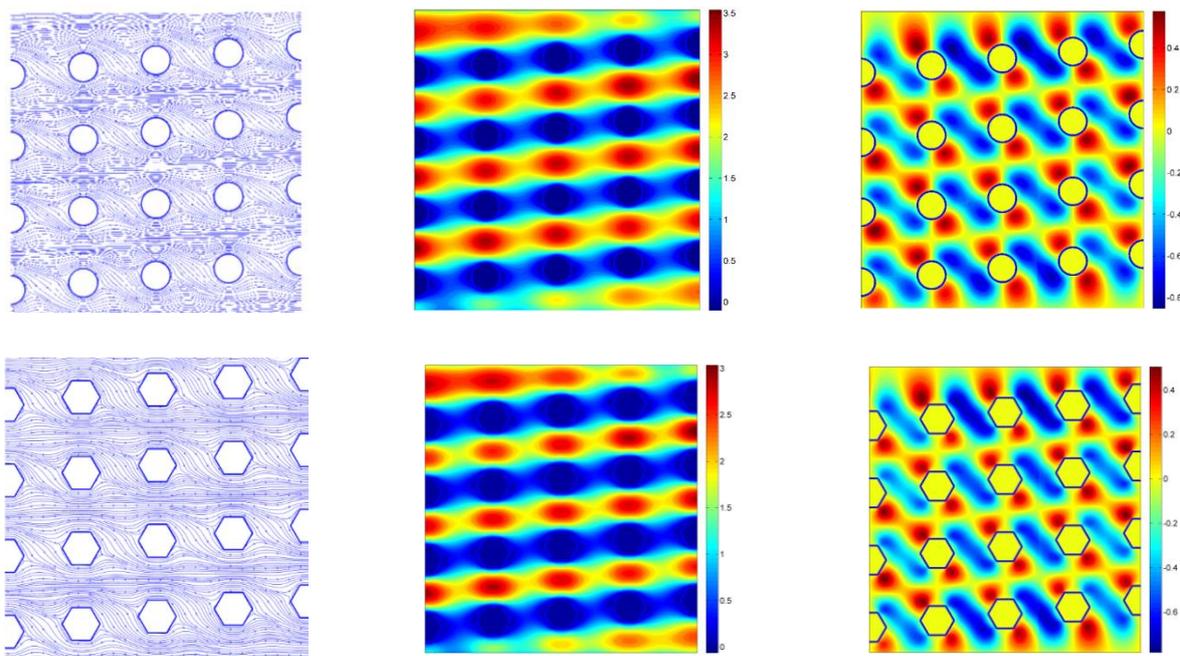


рис.2. Линии тока, продольная и поперечная компоненты скорости (слева направо) в DLD структуре с цилиндрическими и шестиугольными элементами.

Список публикаций:

- [1] J.McGrath, M.Jimenez, H.Bridle. // *Deterministic lateral displacement for particle separation: a review. Lab Chip*, 2014, 14(21), 4139–4158
- [2] J.P.Beech, S.H.Holm, K.Adolfsson, J.O.Tegenfeldt. // *Sorting Cells by Size, Shape and Deformability, Lab Chip*, 2012, 12, 1048–1051
- [3] David W. Inglis, John A. Davis, Robert H. Austinb and James C. Sturm // *Critical particle size for fractionation by deterministic lateral displacement. Lab on a Chip*, 2006, 6(5), 655–658
- [4] Trung S. H. Tran. // *Deterministic Lateral Displacement for Cell Sorting*, 2017

## **Моделирование неустановившейся фильтрации в системе пласт - трещина ГРП**

**Хисамов Артур Альфирович**

*Башкирский государственный университет*

*ООО «РН-БашНИПИнефть»*

*Хабибуллин Ильдус Лутфурахманович, д.ф.-м.н.*

*[khisamovartur@list.ru](mailto:khisamovartur@list.ru)*

Гидравлический разрыв пласта, заключающийся в создании трещин, пересекающихся со скважинами, в настоящее время является одним из основных методов интенсификации добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов. Наличие трещин гидроразрыва приводит к существенным изменениям геометрии и динамики процесса фильтрации. Поэтому является актуальным математическое моделирование процессов фильтрации в пласте с трещиной гидроразрыва. Эти модели достаточно полно разработаны в стационарном приближении. Нестационарные процессы распределения давления исследованы в основном применительно к гидродинамическим методам исследования скважин, которые охватывают ограниченный интервал пространственно-временных изменений давления (расстояния порядка радиуса скважины и времени намного меньше, чем характерное время фильтрации). Коллектора с трудноизвлекаемыми запасами, как правило, характеризуются малой проницаемостью и большой вязкостью нефти. В таких коллекторах, в которых в основном и реализуется гидроразрыв пласта, продолжительность нестационарных процессов перераспределения давления может быть одного порядка с характерным временем фильтрации между скважинами [1]. Поэтому представляет интерес развитие теории нестационарной фильтрации в пластах с трещинами ГРП. В работе представлены новые аналитические решения задачи о нестационарном распределении давления в пласте, пересеченной вертикальной трещиной гидроразрыва при краевых условиях первого, второго и третьего рода на скважине. Решения задач построены методом преобразований Лапласа.

Создание в пласте вертикальных трещин, пересекающихся со скважинами, является одним из эффективных методов интенсификации добычи нефти и газа из малопроницаемых коллекторов. Гидродинамическая связь пласта и скважины, как правило, реализуется только через трещину гидроразрыва. В зависимости от соотношений проницаемостей пласта и трещины, соотношений длины трещины и характерного размера пласта меняются геометрия и интенсивность фильтрационного потока в системе пласт-трещина-скважина. Модели таких фильтрационных потоков достаточно полно развиты в приближении стационарной фильтрации. Нестационарные аналитические модели рассматриваются в основном применительно к задачам гидродинамического исследования скважин и пластов, в которых определяются зависимости от времени дебита скважины или давления на забое скважины, распределения давления в трещине и в пласте не рассматриваются. В то же время, в коллекторах с трудноизвлекаемыми запасами, за счет малой проницаемости пласта и большой вязкости нефти, продолжительность нестационарных процессов распределения давления может быть одного порядка с характерным временем процесса фильтрации. Поэтому актуальным является исследование нестационарных моделей фильтрации в системе пласт-трещина с точки зрения развития общей теории этих процессов, а также для развития методов гидродинамических исследований пластов, методов оценки дебита скважин с трещиной гидроразрыва [2-5].

Представлены новые аналитические решения, описывающие нестационарную фильтрацию жидкости в пластах с вертикальной трещиной гидроразрыва. Полученные решения позволяют исследовать распределения давления и скорости фильтрации в системе пласт-трещина при задании на скважине граничных условий первого, второго и третьего родов. Эти решения и их асимптотические представления имеют значимость для теоретического обоснования методов гидродинамических исследований пластов и для оценки дебита скважин с трещиной гидроразрыва. По полученным в работе выражениям можно построить типовые кривые, описывающие изменение давления на забое скважины или дебита скважины со временем. Сопоставительный анализ этих кривых с данными скважинных исследований позволяет определять коллекторские свойства

трещины и пласта. Использование решений в случае нагнетательных скважин позволяет описать динамику заводнения пластов с трещинами

Список публикаций:

- [1] Cinco-Ley H., Samaniego V.F. *Transient Pressure Analysis for fractured wells // J. Petrol. Technol.* – 1981. –V.33, N9. – P. 1749-1766.
- [2] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. *Моделирование нестационарной фильтрации вокруг скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва // Вестник Башкирского университета.* 2017. Т. 22. №2. С. 309-314.
- [3] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. *К теории билинейного режима фильтрации в пластах с трещинами гидроразрыва // Вестник Башкирского университета.* 2018. Т. 23. №4. С. 958-963.
- [4] Нагаева З.М., Шагапов В.Ш. *Об упругом режиме фильтрации в трещине, расположенной в нефтяном или газовом пласте // ПММ.* 2017. том 81, вып. 3. С. 319-329.
- [5] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. *Нестационарная фильтрация в пласте с трещиной гидроразрыва // Механика жидкости и газа», Известия Российской академии наук, номер 5, 2019 г.*

## Электрогидродинамические процессы в водном мостике

*Шахмаев Ришат Рафикович*

*Башкирский государственный университет*

*Шайхитдинов Рамиль Зайниевич, д.ф.-м.н.*

*[arteban2014@gmail.com](mailto:arteban2014@gmail.com)*

Объектом исследования является водный мост (ВМ), возникающий между двумя стеклянными чашами с дистиллированной воды под действием приложенного постоянного высоковольтного напряжения между электродами, погруженными в жидкость [1]. В результате исследования, выявлен ряд характеристики водного моста (ВМ). Так, например, мост диаметром от 1 до 3 мм и длиной до 25 мм стабильно существует около часа в атмосфере воздуха, кислорода и азота, а в среде гелия и углекислого газа наблюдаются только разрывы разряда между стеклянными чашами [2]. Одной из экспериментально наблюдаемых особенностей ВМ является транспортировка жидкости через мостик; причем, с применением лазерного доплеровского анемометра обнаружено винтовое вращение внешнего слоя воды вдоль продольной оси. Установлено, что после формирования ВМ первоначально общий поток жидкости через мостик направлен от анода к катоду. По истечению нескольких минут направление потока меняется на противоположное и далее наблюдается периодический повтор инверсии за все время существования ВМ. Это периодическое реверсирование потока является установившейся чертой мостика, как полагают [2], обусловлено гидростатическим давлением, возникающим из-за разных уровней воды в стаканчиках.

Эксперименты проводились на аналогичной установке [1]. Дистиллированная вода объемом 60 г наливалась в чашки Петри, одна из которой была установлена на электронные весы с точностью измерений 0.01 г, а другая – на подставке с регулируемой высотой подъема. Диаметры электродов менялись от 0,2 до 6,0 мм.

На рисунке приводятся графики временных зависимостей изменения массы воды в чашке с катодом (массовый расход) при различных диаметрах электродов. Как видно, в рассматриваемом временном интервале наблюдаются области монотонного (кривая 1) и немонотонного (кривая 2) изменений массообмена между чашками. Как показывают эксперименты, если при одинаковых диаметрах электродов (симметричная система) поток воды через ВМ сразу после его формирования направлен в сторону катода, то для несимметричной системы электродов в начальном временном интервале жидкость течет от электрода с меньшим диаметром к электроду с большим диаметром независимо от их полярности.

Для симметричной системы электродов направленность потока в катодную часть мостика можно объяснить следующим образом. Очевидно, что процесс массопереноса обусловлен электропроводностью жидкости, т.е. наличием в среде ионов и действием на них электрического поля. Носителями тока в водной среде являются ионы гидроксония  $\text{H}_3\text{O}^+$  (протоны  $\text{H}^+$ ) и гидроксила  $\text{OH}^-$ , образованные диссоциацией воды по схеме  $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$  с переходом протона от одной молекулы к другой. Поскольку подвижность  $\text{H}_3\text{O}^+$  почти вдвое превышает подвижность  $\text{OH}^-$ , то следует ожидать, что при симметричных электродах после формирования ВМ общий поток воды будет направлен в сторону катода. Направленность потока от электрода меньшего диаметра к электроду с большим диаметром мы объясняем тем, что напряженность электрического поля, как известно, зависит от диаметра цилиндра  $d$  примерно  $E \sim d^{-1}$ , вследствие чего эмиссия зарядов облегчена в области сильных электрических полей. Однако дрейфовое движение ионов не может обеспечить массоперенос жидкости в объеме, наблюдаемом в экспериментах. Действительно, как показывают проведенные нами расчеты, силы, действующие на молекулы воды при бомбардировке их протонами, рассчитанные на основе закона сохранения импульса, примерно на 4 порядка меньше сил, действующих со стороны

электрического поля на ионы  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$ . Поэтому можно утверждать, что если электропроводность в дистиллированной воде обусловлена протонами, то за транспорт жидкости через ВМ отвечают ионы гидроксония и гидроксид-анионы. Это также подтверждается тем, что измеренный нами массовый расход жидкости  $\Delta m/\Delta t$  имеет значение порядка  $10^{-2}$  г/с, в то время как рассчитанная согласно закону электролиза Фарадея величина равна примерно  $4 \cdot 10^{-8}$  г/с. В таком случае логично предположить, что массоперенос жидкости может быть вызван увлечением молекул жидкости ионами воды. Кроме того, на основании элементарных расчетов нами определена роль и эффективность увлечения молекул анионами и катионами в водной среде. Для этого согласно простой гидродинамической модели в предположении, что ион, имеющий дрейфовую скорость движения  $u_0$ , увлекает за собой молекулы вязкой жидкости перпендикулярно направлению  $z$  определено уменьшение скорости движения увлекаемого слоя жидкости до движущегося с такой же скоростью соседнего иона. Рассчитанные с учетом подвижностей зарядов в водной среде, относительные скорости молекул воды на половине расстояния между двумя параллельно движущимися соседними ионами  $u(l_i/2)/u_0$  равны 0.94 и 0.97 для катионов и анионов соответственно. По этой причине можно утверждать о коллективном характере движения молекул воды, которые увлекаются ионами  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$ , образуя тем самым электрогидродинамическое течение жидкости. Обратный поток обусловлен аномально быстрым уходом протонов на катод, вследствие чего в чашке с катодом возникает избыточный отрицательный объемный заряд, а у электрода – слой положительного заряда. Это приводит к инверсии потока от катода к аноду.

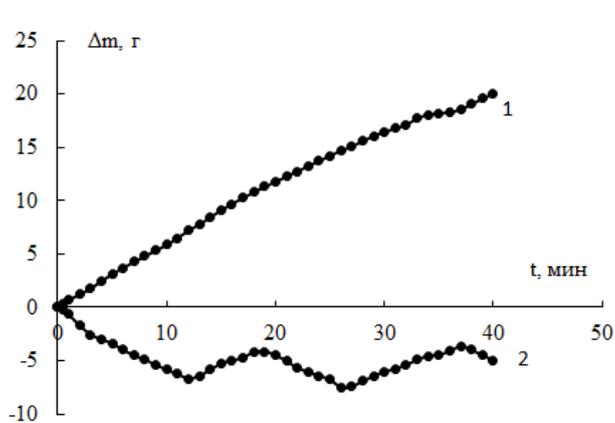


рис. Зависимость массы воды, перетекающей через ВМ, от времени при различных диаметрах электродов, мм:  
 1 -  $r_a=1,4$  и  $r_k=1,8$ ; 2 -  $r_a=1,8$  и  $r_k=1,4$ .

В случае несимметричной системы электродов активным является электрод меньшего диаметра, поскольку у его поверхности напряженность электрического поля больше. Вследствие этого сразу после формирования ВМ поток жидкости направлен к электроду большего диаметра независимо от полярности напряжения между электродами.

Инверсию массопереноса через мостик можно объяснить следующим образом. В процессе токопрохождения из-за аномальной электропроводности протоны быстро достигают поверхности катода, где они, нейтрализуясь, выделяются в виде водорода. Действительно, в процессе проведения экспериментов на поверхности катода появлялись пузырьки газа независимо от направления массопереноса жидкости, что наблюдалось и в других работах [1, 2]. Вследствие быстрого ухода протонов на отрицательный электрод жидкость в емкости с катодом приобретает избыточный отрицательный объемный заряд, что подтверждается повышением показателя pH воды в катодном стакане [1]. С инверсией массопереноса меняется направление осевой составляющей тангенциальной скорости вращения внешнего слоя ВМ в сторону анода. Таким образом, прямой поток А→К вызывается увлечением молекул воды ионами гидроксония, а обратный – ионами гидроксила. Наблюдаемое реверсирование потока жидкости через ВМ обусловлено периодическим образованием объемного заряда в емкости с катодом и его нейтрализации пространственным перераспределением зарядов.

Список публикаций:

- [1] E.C. Fuchs, K. Gatterer, G. Holler and J. Woisetschlager // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V.41, P. 185502.  
 [2] Fuchs, E.C.; Woisetschlager, J.; Wexler, A.D.; Pecnik, R.; Vitiello, G. // Water 2021. V 13, P. 602.



## 16 - Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы и композиты

Анофриев Виталий Александрович, магистрант 1 года обучения  
Тверь, Тверской государственный университет, физико-технический  
**Адаптация метода триангуляции для анализа результатов моделирования эпитаксиального роста наноразмерных пленок**

Сдобняков Николай Юрьевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [deyn1995@mail.ru](mailto:deyn1995@mail.ru) стр. 119

Бабенко Алёна Алексеевна, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Поглощение и излучение СВЧ энергии твердым раствором  $0,8\text{BiFeO}_3 - 0,2\text{LaMnO}_3$**

Сидоренко Евгений Никифорович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [aa.babenko@mail.com](mailto:aa.babenko@mail.com) стр. 120

Бабенко Алина Алексеевна, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Твердые растворы  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0.1 - 0.5$ ) и их структурные особенности**

Рудская Анжела Григорьевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [alinab0004@gmail.com](mailto:alinab0004@gmail.com) стр. 121

Вебер Светлана Сергеевна, аспирант 4 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Структурные фазовые переходы твердых растворов на основе манганита иттрия-лантана в широком диапазоне концентраций**

Рудская Анжела Григорьевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [79281988393@yandex.ru](mailto:79281988393@yandex.ru) стр. 122

Галатова Анастасия Олеговна, аспирант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Исследование гомогенности многокомпонентных материалов методом микро-РСФА**

Рудская Анжела Григорьевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [anastasia.galatova@mail.ru](mailto:anastasia.galatova@mail.ru) стр. 124

Денисова Алиса Олеговна, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**О наборе гидростатических параметров нового бессвинцового пьезоактивного композита со связностью 1-0-3**

Тополов Виталий Юрьевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [alifived193@mail.ru](mailto:alifived193@mail.ru) стр. 126

Кузив Иван Владимирович, аспирант 2 года обучения  
Архангельск, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, высшая школа естественных наук и технологии  
**Определение дефектов в алмазных пластинах методами позитронной аннигиляционной спектроскопии**

e-mail: [i-kuziv@yandex.ru](mailto:i-kuziv@yandex.ru) стр. 127

Лунев Никита Александрович, магистрант 1 года обучения  
Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический  
**Кристаллизация тонких пленок нестехиометрического оксида кремния, индуцированная золотом**

Замчий Александр Олегович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [nanochirik9@gmail.com](mailto:nanochirik9@gmail.com) стр. 128

Лупицкая Юлия Александровна, доцент  
Челябинск, Челябинский государственный университет, физический  
**Гетерогенные твердые электролиты с развитой межфазной границей на основе полисульфатных кислот**

e-mail: [lupitskaya@gmail.com](mailto:lupitskaya@gmail.com) стр. 130

Макинян Нораир Валерикович, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Исследование температурных режимов получения тонких плёнок сульфодида сурьмы методом квазизамкнутого объема**  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [norair.makinyan@yandex.ru](mailto:norair.makinyan@yandex.ru) стр. 131

Митюшкин Евгений Олегович, 3 курс  
Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики  
**Синтез наночастиц YVO<sub>4</sub>, допированных ионами Yb и Er**  
Леонтьев Андрей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [m1tyushck1n@yandex.ru](mailto:m1tyushck1n@yandex.ru) стр. 132

Недоедкова Ольга Вадимона, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Особенности электронной структуры полианилина и композитов ПАНИ/Me (Cu, Zr): исследования методами рентгеновской и УФ-видимой спектроскопии**  
Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [nedoedkova@sfedu.ru](mailto:nedoedkova@sfedu.ru) стр. 133

Рудский Даниил Игоревич, аспирант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Влияние нестехиометрии на структуру манганита лантана**  
Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [rudskiy@sfedu.ru](mailto:rudskiy@sfedu.ru) стр. 134

Сабанова Любовь Александровна, магистрант 1 года обучения  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, Институт математики и информационных технологий  
**Нанокompозитные тонкие плёнки PbS-ZnS**  
Закирова Раушания Мазитовна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [luba1998sa@gmail.com](mailto:luba1998sa@gmail.com) стр. 135

Сабанова Любовь Александровна, магистрант 1 года обучения  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, Институт математики и информационных технологий  
**Оптические свойства многослойных плёнок CdS-PbS**  
Закирова Раушания Мазитовна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [luba1998sa@gmail.com](mailto:luba1998sa@gmail.com) стр. 136

Савина Ксения Геннадьевна, магистрант 1 года обучения  
Тверь, Тверской государственный университет, физико-технический  
**Сравнительное исследование закономерностей избирательной коррозии бинарных наночастиц**  
Сдобняков Николай Юрьевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [kseniya.savina.g@yandex.ru](mailto:kсениya.savina.g@yandex.ru) стр. 137

Смовж Дмитрий Владимирович, зав. лаб.  
Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, физический  
**Механизмы роста графенового слоя при термическом газофазном осаждении на меди**  
e-mail: [dsmovzh@gmail.com](mailto:dsmovzh@gmail.com) стр. 138

Яникаева Полина Эрнстовна, магистрант 2 года обучения  
Нефтекамск, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, машиностроительный  
**Исследование физико-механических характеристик поверхностных слоев чугунов СЧ-20, ВЧ-40**  
Шушков Андрей Александрович, к.т.н.  
e-mail: [yanikaeva.polia@yandex.ru](mailto:yanikaeva.polia@yandex.ru) стр. 139

## Адаптация метода триангуляции для анализа результатов моделирования эпитаксиального роста наноразмерных пленок

Анофриев Виталий Александрович

Иванов Дмитрий Викторович

Тверской государственный университет

Сдобняков Николай Юрьевич, к.ф.-м.н.

[deyn1995@mail.ru](mailto:deyn1995@mail.ru)

В настоящее время активно развиваются методики исследования поверхности наноразмерных пленок для установления закономерностей и механизмов формирования нанорельефа поверхностей [1, 2] с заданными параметрами шероховатости, включая фрактальную размерность. Методы компьютерного моделирования могут имитировать известные технологии, в частности технологию эпитаксиального роста [3] с целью прогнозирования создания поверхности с определенными высотными характеристиками, а также фрактальной размерности. Существующие ПО для анализа изображений, полученных как например с помощью сканирующего зондового микроскопа, так и в результате компьютерного эксперимента не имеют возможности редактирования модулей кода или их пользовательский интерфейс не всегда позволяет в полной мере регулировать входные параметры, используемые для анализа изображений на наличие фрактальных структур и соответственно определения фрактальной размерности. В данной работе мы проводим дальнейшую адаптацию данного ПО [3] с использованием метода триангуляции для анализа результатов компьютерного эксперимента конфигураций пленочных структур на примере пленки платины на поверхности родия (см. рис. 1). Отметим, что, как правило, в качестве потенциала взаимодействия для моделирования эпитаксиального роста выбирается потенциал сильной связи [4], который хорошо апробирован для металлических наночастиц [5].

В данной работе рассматриваются особенности апробации алгоритма триангуляции для подсчета фрактальной размерности. Для реализации расчетной схемы нами использовался метод поиска площади треугольной призмы. Данный метод позволяет производить расчёт фрактальной размерности как изображений усреднённого цвета, так и цветных изображений. Последовательность действий используемых при подсчёте методом триангуляции очень имеет схожие черты с алгоритмом подсчёта кубов [3, 4], но в этом случае оценивается итоговое отношение площадей полученных при построениях к количеству треугольников покрывающих изображение.

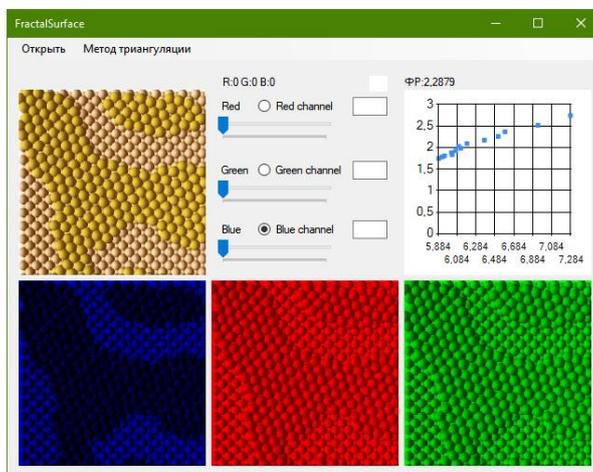


рис.1. Модуль триангуляции для анализа результатов моделирования эпитаксиального роста наноразмерных пленок платины поверхности родия.

### Список публикаций:

- [1] Сдобняков Н.Ю., Антонов А.С., Иванов Д.В. Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография. Тверь: ТвГУ, 2019. 168 с.
- [2] Иванов Д.В., Васильев С.А., Сдобняков Н.Ю. и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2020. Вып. 12. С. 424.
- [3] Иванов Д.В., Антонов А.С., Семенова Е.М., Иванова А.И., Анофриев В.А., Сдобняков Н.Ю. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2021. Вып. 13. С. 156.
- [4] Свидетельство № 2021618928 Российская Федерация. FractalSurface: программа для анализа поверхности на наноуровне / Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев, В.А. Кошелев, А.С. Антонов, Д.В. Иванов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». – № 20216180353; заявл. 27.05.2021; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 02.06.2021. – 1 с.
- [4] Cleri F., Rosato V. // Physical Review B. 1993. V. 48. I. 1. P. 22.
- [5] Сдобняков Н.Ю., Колосов А.Ю., Богданов С.С. Моделирование процессов коалесценции и спекания в моно- и биметаллических наносистемах. Монография. Тверь: ТвГУ, 2021. 168 с.

## Поглощение и излучение СВЧ энергии твердым раствором

$0,8\text{BiFeO}_3 - 0,2\text{LaMnO}_3$

*Бабенко Алена Алексеевна*

*Южный федеральный университет*

*Сидоренко Евгений Никифорович, к.ф.-м.н.*

*[aa.babenko@mail.ru](mailto:aa.babenko@mail.ru)*

В последние годы твердые растворы на основе мультиферроиков широко исследуются, благодаря сочетанию различных фундаментальных физических свойств. Они перспективны для разработки различных устройств электронной техники нового поколения [1]. Получение и изучение твердых растворов, состоящих из классического мультиферроика  $\text{BiFeO}_3$  и ферроика  $\text{LaMnO}_3$  представляют большой интерес из-за наличия в них разнообразных структурных и магнитных фазовых переходов [2].

В диапазоне частот (3,2 -12) ГГц нами исследованы излучающие и поглощающие свойства ряда твердых растворов  $(1-x)\text{BiFeO}_3 - x\text{LaMnO}_3$  с  $x=0,10-0,9$ . Радиопоглощающие материалы в настоящее время применяются в различных областях гражданской, военной и космической техники. Уже разработано большое количество разнообразных типов радиопоглощающих материалов. Но мультиферроики считают наиболее перспективными радиопоглощающими материалами из-за наличия в них повышенных магнитодиэлектрических потерь и высоких значений диэлектрической проницаемости.

Для получения спектров поглощения и излучения электромагнитной СВЧ энергии применялась та же методика, что и в более ранних работах [3,4]. Были использованы три сменных генератора, измеритель КСВН и ослабления, а также симметричная микрополосковая линия. Измеряемые образцы имели форму таблетки диаметром 1 см и высотой 1,5-2 мм. Из спектров поглощения энергии различных составов наибольший интерес представляют спектры твердого раствора  $0,8\text{BiFeO}_3 - 0,2\text{LaMnO}_3$  (рисунок 1).

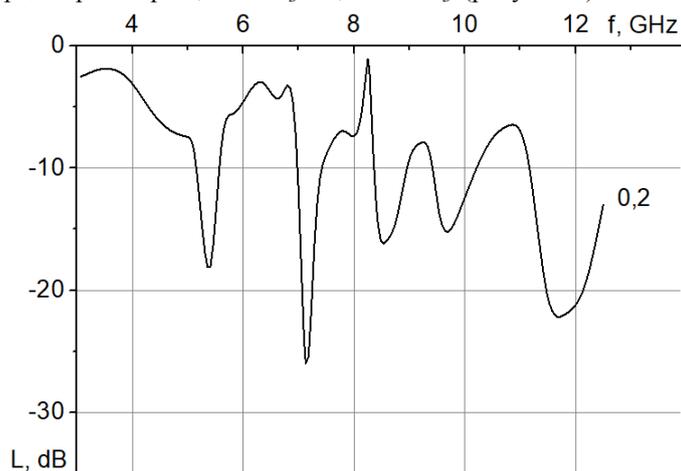


рис.1. Типичный спектр поглощения электромагнитной энергии твердого раствора  $0,8\text{BiFeO}_3 - 0,2\text{LaMnO}_3$  при комнатной температуре.

Спектр интересен из-за наличия в нем на разных частотах больших (до -26 дБ) острых максимумов резонансного характера. Они свидетельствуют о наличии в этом твердом растворе с тетрагональной фазой лабильной доменной структуры. Различные группы подвижных элементов доменной структуры, попадая в переменное электромагнитное поле, совершают вынужденные колебания. В зависимости от степени связи (или эффективной массы) этих элементов резонансные процессы проявляются на различных частотах. В данном спектре резонансные частоты равны 5,3, 7,1, 8,4, 9,6 и 11,6 ГГц. При этом часть энергии электромагнитного поля поглощается и превращается в джоулево тепло. В качестве осцилляторов могут быть доменные стенки механических двойников, имеющихся в большом количестве в доменной структуре сегнетоэлектриков [4].

Кроме того, известно, что во всех керамических и поликристаллических сегнетоэлектриках в области СВЧ частот наблюдается явление диэлектрической дисперсии. Считали, что она вызвана релаксационными процессами. Полученные нами спектры показывают, что свой вклад в диэлектрическую дисперсию вносят не только релаксационные, но и резонансные механизмы.

Часть энергии электромагнитного поля поглощается исследуемым образцом, а часть излучается. Нами получены спектры интегрального излучения напряженности электрического  $E^*$  и индукции магнитного  $B^*$  поля, полученные при комнатной температуре на различных высотах от поверхности исследуемого образца. Для изучения поля были использованы штыревая и петлевая антенны.

Полученные спектры излучения представлены на рисунке 2. На графике  $E^*$  и  $B^*$  - это относительные величины.

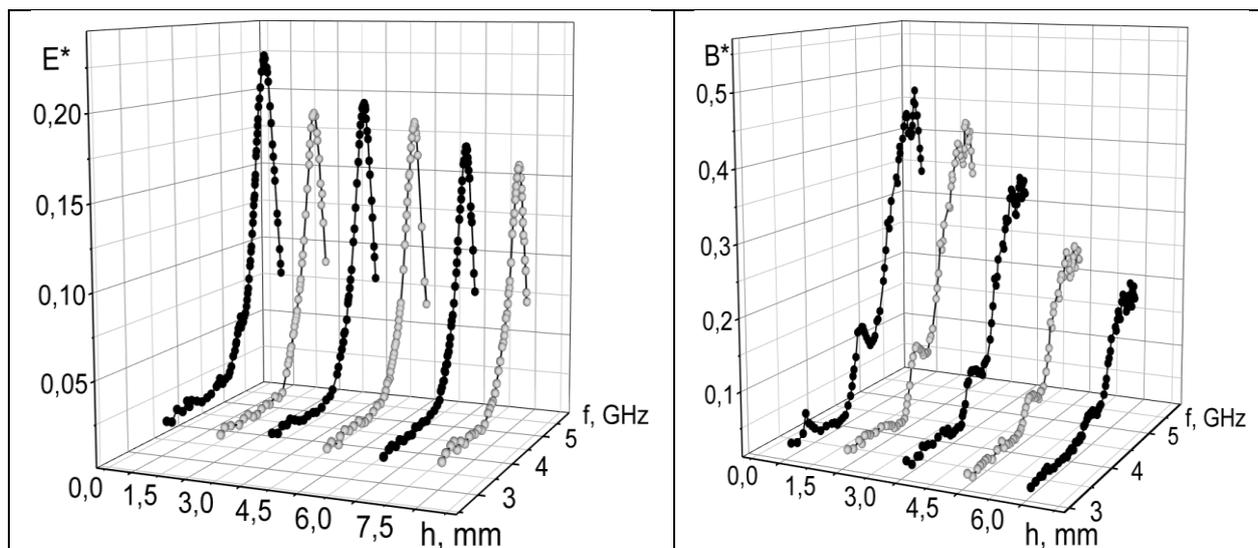


рис.2. Спектры интегрального излучения напряженности электрического  $E^*$  и индукции магнитного  $B^*$  поля на различной высоте от поверхности образца твердого раствора  $0,8\text{BiFeO}_3 - 0,2\text{LaMnO}_3$

В спектрах наблюдается один ярко выраженный максимум на частоте  $\sim 5$  ГГц. Он указывает на то, что используемая система в составе микрополосковой линии с исследуемым образцом цилиндрической формы может выполнять функции узкополосной излучающей антенны. Размеры, форма и СВЧ диэлектрическая проницаемость образца твердого раствора  $0,8\text{BiFeO}_3 - 0,1\text{LaMnO}_3$ , который играет роль цилиндрического диэлектрического резонатора, определяют частоту излучения.

Таким образом, исследуемый твердый раствор со специфическим спектром поглощения энергии может быть перспективным для создания узкополосных заграждающих СВЧ фильтров.

Список публикаций:

- [1] Мультиферроики: получение, свойства, применение. Материалы международной научно-практической конференции под ред. Рубаника В.В. 2019. Витебск, 1–117 с.  
 [2] Rudskaya A.G., Kubrin S.P., Shevchuk A.V., Teslenko N.M., Kabirov Yu.V., Nazarenko A.V., Novikovskiy N.M., Kupriyanov M.F., Rudsky D.I., Kofanova N.B. and Pavlenko A.V. Monograph, Advanced Materials, Springer Proceedings in Physics. – 2018. – Vol. 207. – P. 181-193.  
 [3] Sidorenko E.N., Privalov E.E., Demchenko A.A., Kabirov Yu.M., Chebanova E.M., Nathan I.I. //Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) 2019. P.464 – 467 <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9493854/proceeding>  
 [4] Sidorenko E.N., Chan Thi Beat Ngoc, Prikhodko G.I., Natkhin I.I., Shloma A.V., Kharchenko D.G. // Journal of Advanced Dielectrics Vol. 10, No. 01n02, 2060020 (2020)

## Твердые растворы $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ( $x = 0.1 - 0.5$ ) и их структурные особенности

**Бабенко Алина Алексеевна**

*Краснякова Ирина Олеговна, Рудский Даниил Игоревич*

*Южный федеральный университет*

*Рудская Анжела Григорьевна, д.ф.-м.н.*

[alinab0004@gmail.com](mailto:alinab0004@gmail.com)

К ферриту висмута  $\text{BiFeO}_3$  (BFO) приковано повышенное внимание как к потенциальному бессвинцовому сегнето-пьезоэлектрическому материалу. BFO относится к структурному типу перовскита с полярным искажением кубической ячейки вдоль направления  $[111]$  ниже  $T = 850$  °С и при комнатной температуре характеризуется ромбоэдрической  $R3c$  пространственной группой симметрии. На ячейку приходится шесть формульных единиц  $\text{ABO}_3$ . Параметры ячейки гексагональной установке  $a_H = 5.588$ ,  $c_H = 13.867$  Å [1, 2].

Создание и исследование твердых растворов  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  представляет интерес и является актуальным, так как в зависимости от концентрации второго компонента  $\text{BiCoO}_3$  в твердых растворах можно ожидать

образование разных фаз, концентрационным переходам между которыми могут соответствовать резкие изменения физических свойств.

Образцы  $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  приготовлены методом твердофазного синтеза из предварительно отожженных в течении 4-х часов при температурах  $T_1 = 850$  и  $T_2 = 920$  °С, соответственно, соединений  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{BiCoO}_3$ . Методами рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа проведено исследование структуры и фазового состава полученных образцов при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометрах ДРОН-3М ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение,  $\theta - 2\theta$ ). Регистрация дифракционных профилей проводилась в режиме пошагового сканирования образец-детектор с шагом 0.02 град и временем набора импульсов в каждой точке  $\tau = 2$  с. Обработка рентгенограмм осуществлялась методом полнопрофильного анализа с использованием компьютерной программы PowderCell, версии 2.3, 2.4 и структурных баз данных PDWin 3.0 и Inorganic Crystal Structure Database.

Выявлено, что при увеличении концентрации второго компонента  $\text{BiCoO}_3$  наблюдается следующая последовательность фаз: ромбоэдрическая фаза  $R3c$  наблюдается в интервале концентраций  $0 < x < 0.20$ , соответствующая  $\text{BiFeO}_3$ , в интервале концентраций  $0.30 < x < 0.40$  обнаружена моноклинная фаза с пространственной группой симметрии  $Cm$  и тетрагональная фаза  $P4mm$  – в интервале концентраций  $0.50 < x < 0.70$ , соответствующая  $\text{BiCoO}_3$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) , (БА30110/20-3-07ИФ).

Список публикаций:

[1] Назаренко А.В., Разумная А.Г., Куприянов М.Ф., Кабилов Ю.В., Рудская А.Г., Тесленко П.Ю., Кофанова Н.Б. // ФТТ. 2011. Т. 53(8). С. 1523-1525.

[2] Tripathy S.N., Mishra K.K., Sen S., Mishra B.G., Pradhan D.K., Palai R., Pradhan D.K. // J. of Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 144104.

## Структурные фазовые переходы твердых растворов на основе манганита иттрия-лантана в широком диапазоне концентраций

*Вебер Светлана Сергеевна*

*Рудский Даниил Игоревич*

*Южный федеральный университет*

*Рудская Анжела Григорьевна, д.ф.-м.н.*

*[kozarenkosveta@yandex.ru](mailto:kozarenkosveta@yandex.ru)*

В работе изучена система  $\text{Y}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$  в интервале концентраций  $0.1 \leq x \leq 0.9$ . Особенностью этих твердых растворов является то, что с повышением концентрации ионов La в системе  $\text{Y}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$  наблюдается реконструктивный переход от структуры гексагонального типа, характерной для  $\text{YMnO}_3$ , в перовскитовую ромбоэдрическую структуру, характерную для  $\text{LaMnO}_3$ , при комнатной температуре.

Из литературы известно, что варьирование термодинамических условий приготовления чистого  $\text{YMnO}_3$  приводит к образованию гексагональной структуры – при обычном твердофазном синтезе, и к образованию перовскитовой орторомбической структуры – при синтезе под давлением. Представляет интерес изучение и сравнение такой реконструкции в чистом  $\text{YMnO}_3$  с реконструкцией при замещении ионов Y на ионы La. При этом, небольшие концентрации вторых компонентов (до 10–15 мол.%) могут привести к понижению температуры синтеза на 200–300 °С. Замещение же большими концентрациями вторых компонентов в разных системах приводят к резким изменениям структурных и физических свойств.

Составы твердых растворов  $\text{Y}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$  с  $0.1 \leq x \leq 0.9$  и шагом  $\Delta x = 0.1$  приготавливались методом твердофазного синтеза из стехиометрической смеси  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  и  $\text{La}(\text{OH})_3$ . Синтезировались две партии образцов. Первая партия – с использованием двухступенчатого синтеза при температурах  $T_1 = 1000$  °С (3 час.) и  $T_2 = 1100$  °С (3 час.), вторая партия – при  $T_3 = 1150$  °С в течение 3 часов. Все образцы изучались при комнатной температуре методами РСА и РФА на дифрактометре ДРОН-3М ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение, Ni фильтр, метод пошагового сканирования  $\theta - 2\theta$ ).

После обжига при  $T=1000$  °С гексагональная низкотемпературная фаза  $H_{LT}$  переходит в гексагональную высокотемпературную фазу  $H_{HT}$  (рис.1).

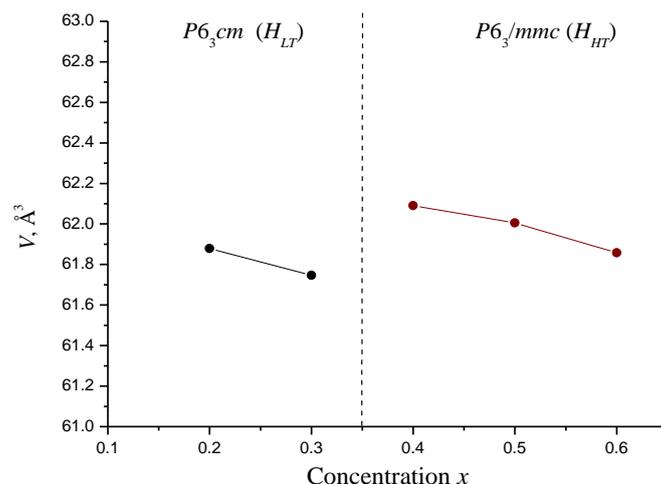


рис. 1. Переход гексагональной низкотемпературной фазы  $H_{LT}$  в гексагональную высокотемпературную фазу  $H_{HT}$

Такому переходу соответствует скачкообразное увеличение объемов  $H_{HT}$  и соответствующие изменения параметров гексагональных ячеек (рис. 2). Уплотнению низкотемпературной фазы  $H_{LT}$  соответствует незначительное уменьшение параметров  $a_H$  ( $\Delta a_H = 0.001 \text{ \AA}$ ) и  $c_H$  ( $\Delta c_H = 0.02 \text{ \AA}$ ). Монотонное уменьшение объемов ячеек высокотемпературной гексагональной фазы  $H_{HT}$  сопровождается незначительным уменьшением параметра  $a_H$  и увеличением  $c_H$  при концентрации  $x = 0.5$ .

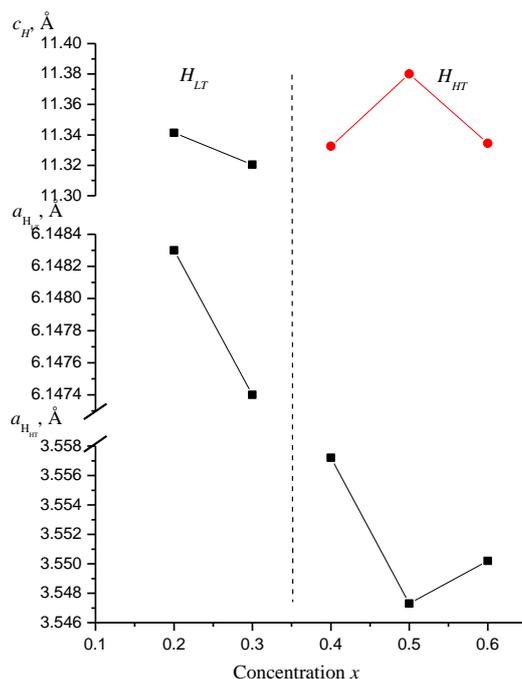


рис. 2. Изменения параметров гексагональных ячеек

После обжига при более высоких температурах данные составы характеризуются увеличением объемов перовскитовых подъячеек, что может соответствовать увеличению беспорядка в размещении Y и La.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032), (БА30110/20-3-07ИФ).

## Исследование гомогенности многокомпонентных материалов методом микро-РСФА

*Галатова Анастасия Олеговна*  
Южный федеральный университет  
Рудская Анжела Григорьевна  
[anastasia.galatova@mail.ru](mailto:anastasia.galatova@mail.ru)

В качестве образцов были использованы: трехкомпонентная система  $(1-x)\text{Pb}(\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3 - x\text{Cd}_{0.5}\text{NbO}_3$  с  $x=0.075; 0.1$  (NN-KN-CN); четырехкомпонентная система  $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3 - x\text{Pb}(\text{Ti}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3$  с  $x = 0.0 \div 1.0$ ;  $\Delta x=0.2$  (NN-KN-CN-PZ-PT); пятикомпонентная система  $(1-x)((\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3 - \text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3) - x\text{Cd}_{0.5}\text{NbO}_3$  с  $x=0.05, 0.075$  (NN-KN-CN-PZ-PT) и шестикомпонентная система  $((\text{Na}_{1-x-y}\text{K}_y\text{Li}_y)_{1-2a}\text{Cd})_{1-z}\text{Pb}_z(\text{Nb}_{1-z}\text{Ti}_{z/2}\text{Zr}_{z/2})\text{O}_3$   $y = 0.05, a = 0.025, x = 0.475, z = 0.25$  и  $y = 0.10, a = 0.050, x = 0.425, z = 0.15$  (NN-KN-CN). Все исследованные образцы были получены твердофазным синтезом в две стадии и спеченные с помощью обычной керамической технологии без извне приложенного давления. Были использованы следующие технологические регламенты: PZ-PT-CN –  $T_{\text{синт.1}} = 1170 \text{ K}, \tau_{\text{синт.1}} = 4 \text{ ч.}, T_{\text{синт.2}} = 1220 \text{ K}, \tau_{\text{синт.2}} = 10 \text{ ч.}, T_{\text{спек.}} = 1490 \text{ K}$ ; NN-KN-CN –  $T_{\text{синт.1}} = 1220 \text{ K}, \tau = 5 \text{ ч.}, T_{\text{синт.2}} = 1240 \text{ K}, \tau = 10 \text{ ч.}; T_{\text{спек.}} = (1420 \div 1430) \text{ K}$  в зависимости от состава; NN-KN-CN-PZ-PT –  $T_{\text{синт.1}} = 1220 \text{ K}, \tau_{\text{синт.1}} = 4 \text{ ч.}, T_{\text{синт.2}} = 1250 \text{ K}, \tau_{\text{синт.2}} = 4 \text{ ч.}, T_{\text{спек.}} = 1490 \text{ K}$ ; NN-KN-LN-CN-PZ-PT –  $T_{\text{синт.1}} = 1220 \text{ K}, \tau_{\text{синт.1}} = 4 \text{ ч.}, T_{\text{синт.2}} = 1240 \text{ K}, \tau_{\text{синт.2}} = 4 \text{ ч.}, T_{\text{спек.}} = 1420 \text{ K}$ .

Микро-РСФА был использован для исследования степени гомогенности химического состава образцов сегнетокерамических материалов. Рентгеноспектральный элементный анализ проведен на рентгеновском микрофлуоресцентном спектрометре M4 TORNADO (Bruker).

В работе выполнено экспериментальное исследование группы гетерогенных многокомпонентных образцов. С помощью математической статистики исследована степень гетерогенности химического состава элементов, входящих в состав исследуемых многокомпонентных систем. Также получены данные распределения химических элементов на поверхности. Рекомендовано проведение рентгенофазового анализа для данных образцов для сопоставления с результатами, полученными в рамках данного микро-РСФА метода.

Методами «AutoPoint» и «Acea» (картирования) были исследованы 8 образцов керамики. В колонках таблицы (таблица 1) показаны химические элементы, распределение которых исследовано на поверхности керамических образцов. Использование микро-РСФА и методов математической статистики позволили определить степень гомогенности (гетерогенности) распределения химических элементов на поверхности керамических образцов. Ниже приведены данные, иллюстрирующие полученные результаты, которые позволяют условно разделить все 4 образцов керамики на 2 группы по степени химической гомогенности и особенностям распределения входящих в них компонентов.

Таблица 1. Перечень химических элементов исследованных образцов.

KP2	KP3	P209	P227
K	K	Na	Na
Ti	Ti	K	K
Zr	Zr	Nb	Nb
Nb	Nb	Cd	Cd
Pb	Pb	-	Pb

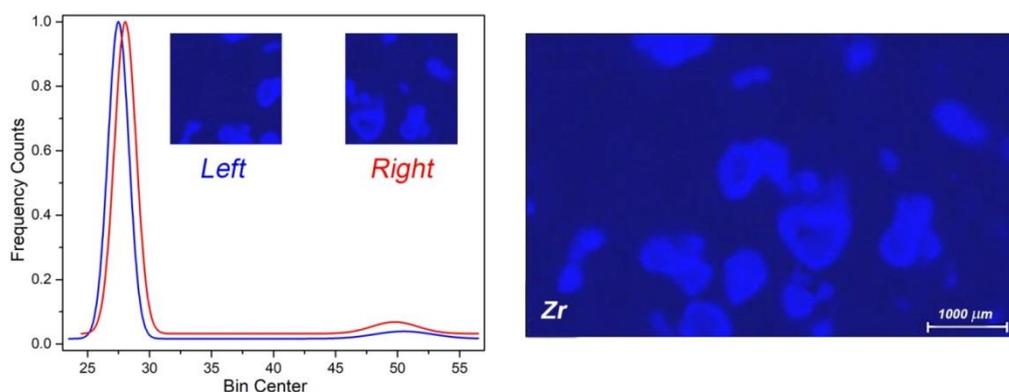


рис. 1. Образец KP2, картирование распределения циркония

Таблица 2. Характеристики образца KP2

Zr	$\sigma$	$F_{\text{расч.}}$	$\bar{x}$	$t_{\text{расч.}}$	$t\sigma/\bar{x} \cdot 100\%$	R	Итог
Left	1.599	1.62	19.14	0.76	17.5	0.888	heterogenic
Right	2.034		17.18		24.9		

В этой группе образцов видны «пятна» – участки неоднородности в распределении концентрации химических элементов. Несмотря на выполнение критериев Фишера и Стьюдента, имеет место большая величина погрешности истинного значения концентрации ( $t\sigma/\bar{x} \cdot 100\%$ ), а также сравнительно низкое значение коэффициента корреляции ( $\sim 0.888$ ). Таким образом, был сделан вывод, что в керамических материалах KP2, KP3 обнаружена химическая гетерогенность. Это подтверждается анализом распределения атомов других химических элементов, входящих в эти образцы.

Ко второй группе относятся образцы P209 и P227. На рисунке 2 и в таблице 3 представлены результаты картирования натрия в образце P227.

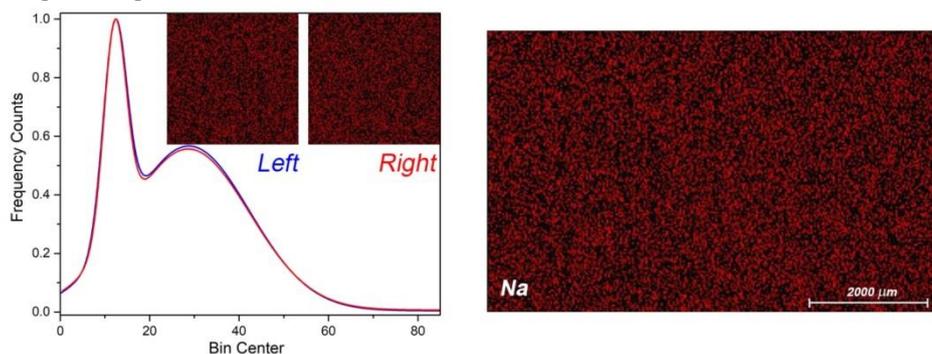


рис. 2. Образец P227, картирование распределения натрия

Таблица 3. Характеристики образца P227

Na	$\sigma$	$F_{\text{расч.}}$	$\bar{x}$	$t_{\text{расч.}}$	$t\sigma/\bar{x} \cdot 100\%$	R	Итог
Left	0.115	1.25	5.96	0.11	4.0	0.998	Heterophasic homogeneous
Right	0.128		5.94		4.5		

«Двугорбая» структура распределения концентрации натрия хорошо воспроизводится обеими половинками исследованной области. Близость кривых хорошо подтверждается довольно высоким значением коэффициента корреляции (0.998). Для этой пары образцов выполняется критерий Стьюдента, т. е. средние значения концентраций двух выборок незначимо различны. На выбранном уровне доверительной вероятности выполняется критерий Фишера, т. е. величины дисперсий имеют незначимые отличия. Сравнительно большая величина  $t\sigma/\bar{x} \cdot 100$  лежит в пределах 5 %, который в данной работе мы полагали приемлемым. Эту пару образцов можно отнести к «гетерофазно-однородным», у которых обе половины имеют идентичные структуры частотного распределения. Однако, двугорбая структура позволяет предположить, что в образцах P209 и P227 существование двух фаз, которые содержат различные концентрации натрия. Представляется полезным для этих образцов проведение рентгенофазового анализа для сопоставления с результатами, полученными в рамках данного микро-РСФА метода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) , (БА30110/20-3-07ИФ).

Список публикаций:

- [1] L.A. Reznichenko, I.A. Verbenko, L.A. Shilkina, A.V. Pavlenko, S.I. Dudkina, I.N. Andryushina, K.P. Andryushin, A.G. Abubakarov, T.V. Krasnyakova, Binary, Ternary and Four-Component Systems Based on Sodium Niobate: Phase Diagrams of States, the Role of the Number of Components and Defectiveness in the Formation of the Properties, Springer Proceedings in Physics. V. 207 (2018) 3-23.
- [2] Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А. и др. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна сегнетопьезоэлектрических материалов. - Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2001, 2002. Т. 1, 2. - 800 с.
- [3] Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы. Изд-во РГУ, 1983. –156 с.
- [4] L. A. Reznichenko, L. A. Shilkina, O. N. Razumovskaya, S. I. Dudkina, E. S. Gagarina, A. V. Borodin Dielectric and Piezoelectric Properties of NaNbO<sub>3</sub>-Based Solid Solutions // Inorganic Materials. 2003, V.39, №2. pp.139-151. <https://doi.org/10.1023/A:1022194512814>.
- [5] Andryushina, I.N., Reznichenko, L.A., Shilkina, L.A., Andryushin, K.P., Dudkina, S.I. The PZT system (PbTixZr1-xO<sub>3</sub>, 0≤x≤1.0): The real phase diagram of solid solutions (room temperature) (Part 2) // Ceramics International 39 (2013), 1285–1292.
- [6] O. Babushkin, T. Lindbäck, J.-C. Luc, J.-Y. M. Leblais, Reaction sequence in the formation of perovskite Pb(ZrO<sub>0.48</sub>Ti<sub>0.52</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Nb<sub>2/3</sub>Ni<sub>1/3</sub>)O<sub>3</sub> solid solution: Dynamic heat-treatment, Journal of the European Ceramic Society. 18 (1998), 137-144.

## О наборе гидростатических параметров нового бессвинцового пьезоактивного композита со связностью 1–0–3

Денисова Алиса Олеговна  
Южный федеральный университет  
Тополов Виталий Юрьевич, д.ф.-м.н.  
[alifived193@mail.ru](mailto:alifived193@mail.ru)

Бессвинцовые пьезоактивные композиты типа 1–3 на основе полидоменных (domain-engineered) сегнетоэлектрических кристаллов [1] представляют интерес вследствие высокой пьезоэлектрической чувствительности и анизотропии, а также больших значений ряда других параметров. Гидростатические параметры данных композитов демонстрируют многочисленные примеры немонотонного концентрационного поведения, что важно учитывать при выборе компонентов и при последующих применениях. Цель настоящего исследования – анализ гидростатических параметров бессвинцового композита со связностью 1–0–3, матрица которого представляет собой 0–3-композит с определенными микрогеометрическими характеристиками. Главный компонент композита – поляризованный вдоль [001] полидоменный кристалл  $[\text{Li}_x(\text{K}_{1-y}\text{Na}_y)_{1-x}](\text{Nb}_{1-z}\text{Ta}_z)\text{O}_3:\text{Mn}$  (KNNTL-Mn) со структурой типа перовскита, где  $x = 0,06$ ,  $y = 0,1 \dots 0,3$ ,  $z = 0,07 \dots 0,17$ , и допирование Mn составляет 0,25 мол. %.

Исследование проводится в рамках модели пьезоактивного 1–0–3-композита [2]. В нашем случае система стержней из кристалла KNNTL-Mn в форме прямоугольного параллелепипеда с квадратным основанием окружена протяженной 0–3-матрицей "корундовая керамика – полиэтилен", и корундовые включения в матрице имеют форму сфероида (рис. 1, а). Предполагается регулярное расположение стержней и включений в композитном образце. Вектор спонтанной поляризации  $P_s^{(1)}$  каждого кристаллического стержня направлен вдоль [001] перовскитовой ячейки, причем ось  $OX_3$  параллельна [001] и является осью поляризации композита в целом (см. рис. 1, а). Форма включения характеризуется аспектным отношением  $\rho_i = a_1 / a_3$ , где  $a_1$  и  $a_3$  – длины полуосей сфероида. В нашей работе  $\rho_i$  варьируется от 0,01 (сильно вытянутое включение вдоль оси  $OX_3$ ) до 100 (сильно сплющенное включение). Электроды на композитном образце считаются ориентированным перпендикулярно оси  $OX_3$ . Нами применены последовательно метод эффективного поля [3] для расчетов эффективных свойств 0–3-матрицы и матричный метод [3] для расчетов эффективных упругих, пьезо- и диэлектрических свойств композита. Эффективные свойства композита использованы для расчета набора его гидростатических параметров. Этот набор составляют гидростатические

а) пьезокоэффициенты  $d_h^* = d_{33}^* + d_{32}^* + d_{31}^*$  и  $g_h^* = g_{33}^* + g_{32}^* + g_{31}^* = d_h^* / \epsilon_{33}^{*\sigma}$ ;

б) квадрат параметра приема  $(Q_h^*)^2 = d_h^* g_h^* = d_h^* / \epsilon_{33}^{*\sigma}$ ;

в) коэффициент электромеханической связи  $k_h^* = d_h^* / (\epsilon_{33}^{*\sigma} s_h^{*E})^{1/2}$ ,

где  $\epsilon_{33}^{*\sigma}$  – диэлектрическая проницаемость механически свободного образца,  $s_h^{*E}$  – гидростатическая упругая податливость при электрическом поле  $E = \text{const}$ . Эффективные свойства и гидростатические параметры данного композита зависят от объемных концентраций  $m$  и  $m_i$  (см. рис. 1, а), а также от аспектного отношения  $\rho_i$ . Расчеты проведены с использованием измеренных при комнатной температуре электромеханических констант поляризованного вдоль [001] кристалла KNNTL-Mn [4], а также полиэтилена [3] и корундовой керамики [5].

Максимумы гидростатических параметров 1–0–3-композита на основе кристалла KNNTL-Mn наблюдаются при относительно небольших объемных концентрациях  $m$  кристалла, что указывает на важную роль 0–3-матрицы "корундовая керамика – полиэтилен" в формировании гидростатического пьезоэлектрического отклика композита вблизи данных максимумов. Наиболее важным представляется случай 0–3-матрицы с  $\rho_i = 100$ , в которой проявляется большая упругая анизотропия. В частности, при объемной концентрации корунда  $m_i = 0,05 \dots 0,20$  в 0–3-матрице исследованный композит характеризуется значениями  $\max d_h^* \approx (260 \dots 270)$  пКл/Н и  $\max[(Q_h^*)^2] \approx (260 \dots 290) \cdot 10^{-12}$  Па<sup>-1</sup>. Определяемые на основе экспериментальных данных [4] гидростатические параметры кристалла KNNTL-Mn равны  $d_h^{(1)} = 25$  пКл/Н и  $(Q_h^{(1)})^2 = 0,109 \cdot 10^{-12}$  Па<sup>-1</sup>. Гидростатический коэффициент электромеханической связи  $k_h^*$  при  $\rho_i = 100$  вблизи максимума составляет около 0,6 ... 0,7 (см. рис. 1, б), что примерно в пять раз превышает аналогичный параметр кристалла KNNTL-Mn  $k_h^{(1)} = 0,128$ . Наши результаты по гидростатическим параметрам сопоставлены с литературными данными по пьезоактивным композитам типа 1–3. Благодаря большим значениям гидростатических параметров исследованный бессвинцовый композит на основе кристалла KNNTL-Mn может найти применение в качестве активных элементов гидроакустических устройств и систем.

Исследование проведено при финансовой поддержке в рамках Внутреннего гранта Южного федерального университета № ВнГр-07/2020-04-ИМ (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

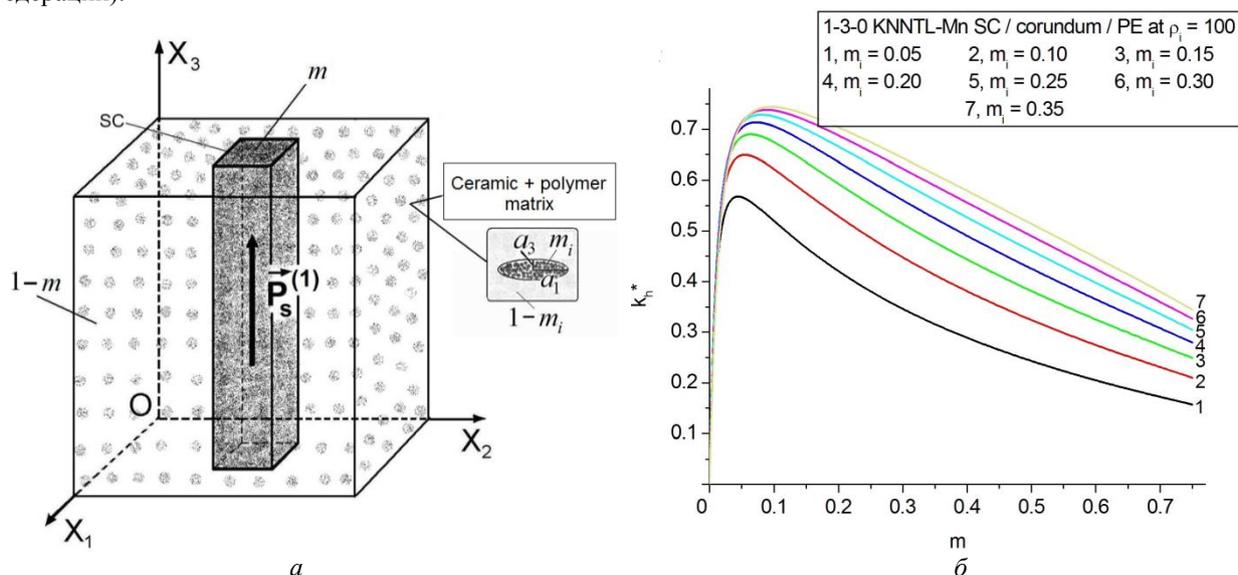


рис.1. Схематическое изображение 1–0–3-композиата (а) и примеры концентрационных зависимостей гидростатического коэффициента электромеханической связи  $k_h^*$  1–0–3-композиата "кристалл KNNTL-Mn – корундовая керамика – полиэтилен" (б) при  $\rho_1 = 100$ .

Список публикаций:

- [1] Zhou D., Lam K. H., Chen Y., Zhang Q., Chiu Y. C., Luo H., Dai J., Chan H. L. W. // *Sens. Actuators A – Phys.* 2012. V. 182. № 1. P. 95.  
 [2] Topolov V. Yu., Isaeva A. N. // *Ferroelectrics Lett. Sec.* 2017. V. 44. №№ 4–6. P. 73.  
 [3] Topolov V. Yu., Bowen C. R., Bisegna P. *Piezo-active composites. Microgeometry – sensitivity relations.* – Cham: Springer Internat. Publ., 2018.  
 [4] Huo X., Zhang R., Zheng L., Zhang S., Wang R., Wang J., Sang S., Yang B., Cao W. // *J. Am. Ceram. Soc.* 2015. V. 98. № 6. P. 1829.  
 [5] Borzov P. A., Filippov S. E., Topolov V. Yu., Brill O. E., Panich A. E. // *Adv. Compos. a. Hybrid Mater.* 2018. V. 1. № 3. P. 558.

## Определение дефектов в синтетических алмазных пластинах методами позитронной аннигиляционной спектроскопии

**Кузив Иван Владимирович**

*Долгобородов Дмитрий Александрович*

*Северный(Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова*

[i-kuziv@yandex.ru](mailto:i-kuziv@yandex.ru)

Основной проблемой, ограничивающих использование синтетических алмазов, является необходимость диагностики, анализа и контроля уровня присутствующих в них дефектов. Такие дефекты как вакансии, дислокации, а также примеси и замещения определяют не только механические свойства кристалла, но и в значительной мере влияют на теплофизические, электромагнитные, а также квантовые свойства кристалла.

Проведены исследования синтетических алмазных пластин, выращенных по технологии НТНР используя метод температурного градиента. Для исследования использовалась первая серия синтетических алмазных пластин размерами 3x3 мм с высотой 0,5 мм и 1,5 мм, а также вторая серия синтетических алмазных пластин с произвольной формой.

Для определения дефектов, а также анализа концентрации дефектов использовалась позитронная аннигиляционная спектроскопия. Позитронная аннигиляционная спектроскопия представляет собой уникальный инструмент неразрушающего контроля, в основе которой лежит процесс аннигиляции. В качестве источника позитронов использовался  $^{22}\text{Na}$ . Позитронная аннигиляционная спектроскопия может быть реализована тремя методами, а именно: используя метод измерения времени жизни позитронов, метод доплеровского уширения аннигиляционной линий, а также метод углового распределения аннигиляционных

фотонов [1,2]. В нашем исследовании использовались первые два метода, при этом второй метод (метод доплеровского уширения аннигиляционной линий) был реализован используя непосредственно источник позитронов, а также пучок позитронов с энергиями от 0 до 20 кэВ.

В результате эксперимента были получены данные о времени жизни позитронов в синтетических алмазных пластинах второй серии. Среднее время жизни позитронов в алмазной пластине с концентрацией азота 12,5 ppm составило 197 пс, для алмазной пластины с концентрацией азота 75 ppm составило 215 пс, а для алмазной пластины с концентрацией азота 88 ppm составило соответственно 233 пс. При анализе данных, полученных при измерении среднего времени жизни позитронов в образцах, можно выделить для каждого образца две компоненты времени жизни (таблица 1). Расчет проводился на глубине до 20 мкм.

Таблица 1. Зависимость времени жизни позитронов в образцах от концентрации азота.

Концентрация азота, ppm	$\tau_1$ , ps	$I_1$ , %	$\tau_2$ , ps	$I_2$ , %
12,5	153 ± 1	55,9	258 ± 1	44,1
75	171 ± 1	68,7	332 ± 1	31,3
88	207 ± 1	79,4	350 ± 1	20,6

Все дефекты обнаруженные во второй серии образцов являются дефектами вакансионного типа, а именно моновакансии и кластеры вакансий. Во второй серии образцов все позитроны были аннигилированы в дефектах. Поскольку дефектов в образцах второй серии оказалось много - определить скорость захвата и концентрацию дефектов невозможно.

Исследование первой серии образцов методом доплеровского уширения аннигиляционной линии, реализованным с помощью пучка позитронов показал наличие незначительных дефектов в синтетических алмазных пластинах на глубине до 2 мкм.

Список публикаций:

- [1] I. Prochazka, *Positron Annihilation Spectroscopy // Materials Structure*. 2001, №8(2). p. 55-60  
 [2] P. Horodek, M. Eseev and A. Kobets, // *Nukleonika*. 2015, 60, p. 721-724

## **Кристаллизация тонких пленок нестехиометрического оксида кремния, индуцированная золотом**

**Лунев Никита Александрович**

*Баранов Евгений Александрович, Меркулова Ирина Евгеньевна, Константинов Виктор Олегович*

*Новосибирский государственный университет*

*Замчий Александр Олегович, к.ф.-м.н.*

[nanochirik9@gmail.com](mailto:nanochirik9@gmail.com)

Получение тонких пленок поликристаллического кремния (poly-Si) высокого качества на дешевых подложках, например, стекле, является важной задачей в областях солнечной энергетики и микроэлектроники. Одним распространенных подходов для получения пленок poly-Si является металл-индуцированная кристаллизация (МИК) аморфного материала на стеклянной подложке [1]. В качестве катализатора могут быть использованы различные металлы, такие как алюминий, никель, индий, золото. Основным преимуществом золота по сравнению с другими металлами в приложении к МИК является низкое значение температуры эвтектики системы Au-Si (363 °C) по сравнению с температурой плавления ее составляющих. Зачастую в исходных пленках аморфного кремния имеются примеси кислорода. Поэтому возникает интерес исследовать МИК аморфного нестехиометрического оксида (субоксида) кремния ( $a\text{-SiO}_x$ ), индуцированную золотом. В данной работе изучалось влияние температуры и длительности отжига на процесс МИК  $a\text{-SiO}_{0.2}$  с использованием золота в качестве катализатора.

Получение исходных образцов осуществлялось следующим образом. Тонкие пленки золота толщиной 30 нм были нанесены на подложки методом термовакuumного напыления. Затем тонкие пленки  $a\text{-SiO}_x$  толщиной 150 нм были осаждены на получившиеся структуры методом газофазного плазмохимического осаждения. Стехиометрический коэффициент был определен методом ИК-Фурье спектроскопии и составил 0.2. Отжиг происходил в печи в высоком ( $\sim 10^{-5}$  Па) вакууме. Полученные образцы отжигались при температурах 320 - 500 °C в течение 8.5 часов и при температуре 350 °C в течение 3 - 20 часов. Структурные характеристики отожженного материала были изучены методами оптической микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света, дифракции отраженных электронов (ДОЭ) и просвечивающей электронной микроскопии

(ПЭМ). Фазовый состав был исследован с помощью рентгенофазового анализа (РФА). Элементный состав - методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Данные, полученные с помощью метода ПЭМ в поперечном сечении, позволили подтвердить реализацию механизма обмена слоями [2] для образца, отожженного при 500 °С, в ходе которой диффузия атомов аморфного кремния в толщу металла привела к образованию пленки poly-Si на месте исходной пленки золота (т.е. на подложке). Металл же диффундировал наверх, смешавшись с остаточным а-SiO<sub>0.2</sub>.

Метод ДОЭ был использован для изучения среднего размера кристаллитов в пленке poly-Si. Для этого верхняя пленка была удалена методом химического травления. Методика показала, что в результате отжига образца при 340 °С средневзвешенный по площади размер кристаллита составил около 20 мкм, а отжиг при 400 °С приводил образования кристаллитов со средневзвешенным размером до 10 мкм. По всей видимости, повышение температуры отжига ведет к ускорению кинетики образования и роста зародышей, что приводит к увеличению их концентрации и, как следствие, к уменьшению среднего размера кристаллита в пленке.

Фазовый состав композитного материала, отожженного в течение 8.5 часов в диапазоне от 320 °С до 400 °С, был исследован методом рентгенофазового анализа (рис. 1). Дифрактограмма образцов до отжига содержит только интенсивный пик от зерен золота без сигнала от кристаллического кремния, что говорит об аморфной структуре осажденного а-SiO<sub>0.2</sub>. Для образцов, отожженных при 320 °С, проявляются пики метастабильных силицидов Au<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>. Далее с ростом температуры происходит кристаллизация пленки аморфного субоксида кремния, что видно по возникновению сигнала от кристаллической фазы Si. Видно также, что в ходе отжига интенсивность рефлексов, соответствующих силицидам золота различной ориентации, постепенно уменьшается с ростом температуры отжига и полностью исчезают при температуре процесса 400 °С. В работах, посвященных золото-индуцированной кристаллизации аморфного кремния, эти соединения распадаются уже при 200 °С при временах отжига того же порядка, что и в данном исследовании [3].

Таким образом, пленки poly-Si впервые были получены методом золото-индуцированной кристаллизации а-SiO<sub>0.2</sub>. Кристаллизация происходит при отжиге свыше 320 °С в течение 8.5 часов в результате реализации механизма обмена слоями и образования метастабильных силицидов золота. При этом средний размер кристаллитов составляет от 10 - 20 мкм.

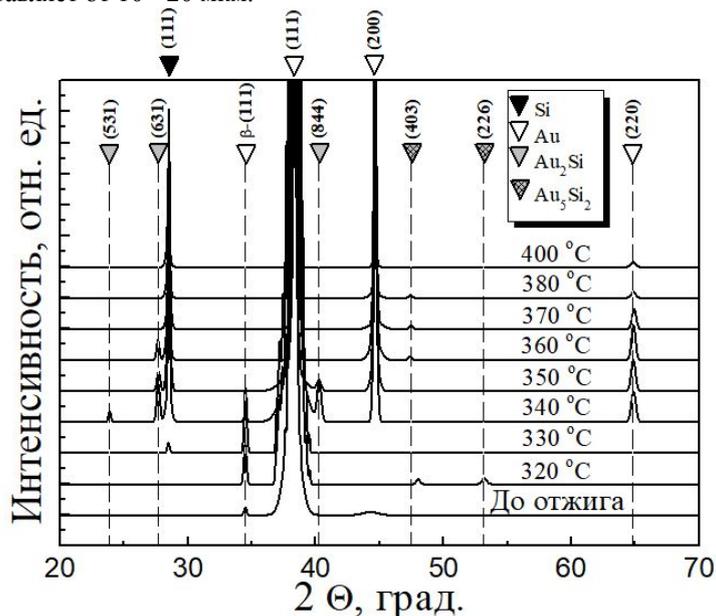


рис.1. Дифрактограммы образцов, отожженных в диапазоне от 320 °С до 400 °С в течение 8.5 часов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10143).

Список публикаций:

- [1] Toko K., Suemasu T. // *J. Phys. D.* 2020. Т. 53. №. 37. С. 373002.
- [2] Nast O // *PhD Thesis. University of Marburg, Germany.* 2000.
- [3] Hultman L. et al. // *J. Appl. Phys.* 1987. Т. 62. №. 9. С. 3647-3655.

## Гетерогенные твердые электролиты с развитой межфазной границей на основе полисурьмяных кислот

Луницкая Юлия Александровна

Захарьевич Дмитрий Альбертович, Коваленко Лилия Юрьевна

Челябинский государственный университет

[lupitskaya@gmail.com](mailto:lupitskaya@gmail.com)

Материалы с протонной проводимостью представляют большой интерес благодаря их возможному практическому применению в электрохимических устройствах, таких как батареи, топливные элементы, электрохромные устройства [1]. В этой связи одним из актуальных научных направлений в сфере водородной энергетики является разработка низко- и среднетемпературных топливных элементов для использования их в качестве альтернативы традиционным источникам тока.

Однако, несмотря на большое количество исследований в области разработки низкотемпературных протонных проводников, за последнее двадцатилетие не было выявлено новых однофазных неорганических материалов, способных работать в составе электрохимических устройств в широких диапазонах внешних условий. В последнее время внимание исследователей привлекли композиционные материалы, одним из компонентов которых является протонный проводник, помещенный в матрицу, обеспечивающую стабильность его химического (фазового состава) и/или выступающую в роли донора различных дефектов. Первые же исследования показали не только перспективность такого подхода, но и поставили ряд вопросов, касающихся механизма увеличения проводимости и способов управления ею [2]. Так, цель настоящей работы - разработка нового класса протонпроводящих материалов в виде композитов с высокопроводящим межфазным слоем (интерфейсом), содержащим повышенную концентрацию подвижных носителей заряда за счет поверхностной химической реакции между компонентами композита. Одним из известных способов получения таких соединений является метод соосаждения из растворов. В данной работе композиционные материалы (полисурьмяная кислота (ПСК) - дигидрофосфат щелочного металла) были получены путем осаждения растворимого гидрофосфата на поверхность нерастворимой твердой кислоты.

Анализ проведенных комплексных физико-химических исследований для широкого набора составов композита с участием гидрофосфатов различных металлов и производных полисурьмяной кислоты показал, что протонный транспорт в полисурьмяной кислоте состава  $Sb_2O_5 \cdot nH_2O$  и ее производных осуществляется по механизму Гроттуса и зависит от степени гидратации  $n$ . В частности, при ( $n = 3$ ) происходит заполнение полостей каркаса молекулами воды, которые принимают участие в переносе протона, и обуславливают значения проводимости до  $10^{-3}$  См/см при комнатной температуре. С ростом степени гидратации ( $n = 5$ ) при комнатной температуре и 100% влажности проводимость осуществляется по поверхности частиц ПСК и достигает 0,1 См/см.

Установлено, что в композиционных материалах на основе ПСК, полученных путем осаждения дигидрофосфатов натрия и калия на поверхность частиц ПСК, наблюдается максимум протонной проводимости при содержании фосфата 10-15 (об.%), значение которой при комнатной температуре для состава ПСК/NaDP с объемной долей фосфата 12% достигает 0,05 См/см.

Кроме того, в докладе приводится обсуждение способов получения таких композитов, условий образования поверхностного граничного слоя (интерфейса), обогащенного подвижными носителями заряда вследствие ионного обмена между компонентами композита и влияния примесных элементов, входящих в состав полисурьмяной кислоты, на свойства композиционного материала.

Список публикаций:

[1] Stenina I.A., Yaroslavtsev A.B. // *Russian Journal of Inorganic Materials*. 2017. Vol. 53. № 4. P. 343.

[2] Paschos O., Kunze J., Stimming U., Maglia F. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2011. Vol. 23. 234110.

## Исследование температурных режимов получения тонких плёнок сульфоиодида сурьмы методом квазизамкнутого объема

*Макинян Норайр Валерикович*  
*Южный федеральный университет*  
*Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.*  
*[norair.makinyan@yandex.ru](mailto:norair.makinyan@yandex.ru)*

Сульфоиодид сурьмы (SbSI) обладает широким спектром полезных свойств и является востребованным материалом во многих отраслях промышленности для изготовления датчиков света, влажности и т. д.

На сегодняшний день существуют несколько способов получения плёнок сульфоиодида сурьмы. Наиболее распространенными являются сонохимический метод [1, 2] из смеси сурьмы, серы и йода, гидротермальное осаждение в автоклаве или химическое осаждение паров при высоких температурах. Эти методы имеют большую продолжительность (от 4 часов и более). В работе [3] был представлен другой, менее продолжительный способ, но реализуемый в 2 этапа. Первый этап предполагает осаждение тонкой плёнки сульфида сурьмы ( $Sb_2S_3$ ) в низкотемпературной химической ванне. На втором этапе осуществляется превращение аморфного  $Sb_2S_3$  в кристаллический SbSI путем испарения соединения-мишени  $SbI_3$  на подложку с осажженной тонкой плёнкой сульфида сурьмы ( $Sb_2S_3$ ) и дальнейшим отжигом в печи. В работе [4] предложен метод импульсного лазерного осаждения (взрывное испарение), суть которого заключается в быстром нагреве смеси компонентов до определенной температуры, которая заведомо выше температуры испарения самого слаболетучего соединения. Результатом процесса является осажженная аморфная плёнка, которую, как и в предыдущем методе, необходимо отжечь для повышения кристалличности.

Метод квазизамкнутого объема [5], впервые предложенный для получения плёнок SbSI в работе [6], предпочтителен тем, что достаточно прост, проводится в условиях, близких к равновесным, имеет малую продолжительность и проводится в одну стадию. Он основан на испарении соединения-источника в квазизамкнутом объеме и конденсации вещества пара на подложке с меньшей температурой. Однако поскольку SbSI испаряется инкогруэнтно: разлагается на два компонента (легко испаряющееся соединение  $SbI_3$  и слаболетучее соединение  $Sb_2S_3$ ), необходимо принимать особые меры для получения плёнок SbSI и правильно подобрать температурный режим этого метода.

Цель настоящей работы заключалась в совершенствовании автоматизированного контроля режима экспериментов и в изучении возможности получения плёнок SbSI в более широком, чем было рассмотрено ранее [7], диапазоне температурных условий.

При использовании данного метода крайне важно контролировать температуру подложки, на которой формируется тонкая плёнка, так как при температуре, отличной от необходимой, возможно, что реакция пройдет не корректно, либо может произойти реиспарение уже образовавшейся плёнки. С этой целью используется цифровая видеосъемка состояния конденсата на стеклянной подложке и автоматизированная запись информации с помощью специально разработанного программно-аппаратного комплекса [8] о напряжении нагревателя и термоэдс термопар, размещенных в области источника и на подложке.

Поскольку термопара, контролирующая температуру подложки, может быть размещена в этом методе только с внешней её стороны, возникла необходимость в оценке поправки температуры на толщину подложки. Это было сделано по видеоконтролю процесса плавления кусочков индия, размещенных на стеклянной подложке по другую сторону от термопары.

В качестве испаряемого материала использовался готовый порошок SbSI, синтезированный в лаборатории химического факультета ЮФУ из водного раствора по методу [9] и легированный во время своего синтеза атомами Сг для повышения температуры фазового перехода. Использование в методе квазизамкнутого объема источника в виде порошка предпочтительно благодаря возможности нагревать его более однородно, нежели отдельные кристаллы SbSI обычно игольчатого вида.

По результатам проведенных экспериментов при максимальных температурах источника в диапазоне от 240 °С до 430 °С выяснено, что появление конденсата на подложке начинается в интервале температур источника от 80 °С до 115 °С. Этот конденсат, судя по его оранжевому цвету, соответствует легколетучему соединению  $SbI_3$ . Образование плёнки SbSI начинается в интервале температур подложки от 120 °С до 140 °С. Этот температурный интервал близок к результатам, описанным в обзоре [10], согласно которым плёнки SbSI формировались методом взрывного испарения в диапазоне температур подложки от 140 °С до 170 °С.

Проведенные эксперименты показали, что при относительно низкой температуре источника (около 240 °С) и медленном нагреве всей испарительной системы, качество плёнок резко ухудшается, несмотря на то, что температура подложки достигает необходимых для образования плёнки значений. Это связано с тем, что

легколетучий компонент ( $\text{SbI}_3$ ) успеваает вновь испариться, и в тот момент, когда  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  начинает конденсироваться на подложке, поверхностная концентрация обоих компонентов различна, что приводит некачественному образованию плёнки или же она вовсе не образуется.

Список публикаций:

- [1] Nowak M., Szperlich P., Bober L., Szala J., Moskal G., Stroz D. Sonochemical preparation of SbSI gel // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2008. V.15. P.709-716.
- [2] Mistewicz K., Nowak M., Paszkiewicz R., Guiseppi-Elie A. SbSI nanosensors: from gel to single nanowire devices // *Nanoscale Research Letters*. 2017. V.12, P.97.
- [3] Goedel K. C., Steiner U. Thin film synthesis of SbSI micro-crystals for self-powered photodetectors with rapid time response [Text] // *Nanoscale*. 2016. V.8.
- [4] Surthi S., Kotru S., Pandey R. K. Preparation and electrical properties of ferroelectric SbSI films by pulsed laser deposition [Text] // *Journal of materials science letters*. 2003. V.22, P.591-593.
- [5] Бубнов Ю. З., Лурье М. С., Старос Ф. Г., Филаретов Г. А. Вакуумное нанесение плёнок в квазизамкнутом объеме // *М.: Сов. радио*. 1975. 160 с.
- [6] Гершанов В. Ю., Меринова Е. Г., Рогач Е. Д. Получение и некоторые свойства сегнетоэлектрических плёнок  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  и SbSI // II Всесоюз. конф. по физикохимическим принципам технологии сегнетоэлектриков и родственных материалов, г. Звенигород. 1983. С.185.
- [7] Дружинина Е. С., Гармаиов С. И. Исследование процесса формирования плёнок сульфидида сурьмы методом квазизамкнутого объема // Сборник тезисов, материалы Двадцать третьей Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых (ВНКСФ-23, Екатеринбург): материалы конференции, тезисы докладов: Т.1. Екатеринбург-Ростов-на-Дону: Уральское изд-во, издательство АСФ России. 2017. С.415–416.
- [8] Гармаиов С. И., Терехин К. А., Макинян Н. В., Иришин А. Г. Программно-аппаратный комплекс для контроля режимов управления видеосъемкой при проведении научных экспериментов // *Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: материалы XXVIII научной конференции (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 13 – 15 мая 2021 г.) [Электронное издание] – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного фед. ун-та. 2021. С.119-121.*
- [9] Медведева Е. С., Лупейко Т. Г., Свирская С. Н., Лукишина И. А. Анализ известных способов получения сульфидида сурьмы. Оптимизация водного синтеза // *Материалы Пятого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума «Физика бесвинцовых пьезоактивных и родственных материалов» (LFPM-2016), 12–15 сентября 2016 г, г. Ростов-на-Дону –г.Туапсе. –г. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2016. Т.2. С.50–53.*
- [10] Берча Д. М., Ворошилов Ю. В., Сливка В. Ю., Туряница И. Д. Сложные халькогениды и халькогалогениды (получение и свойства) [Текст] // *Львов: Вища школа. Изд-во при Льво. ун-те*. 1983. С. 184.

## Синтез наночастиц $\text{YVO}_4$ , допированных ионами Yb и Er

Митюшкин Евгений Олегович

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Леонтьев Андрей Владимирович, к.ф.-м.н.

[m1tyushck1n@yandex.ru](mailto:m1tyushck1n@yandex.ru)

Одной из активно используемых информативных и не инвазивных техник микроскопии давно стала люминесцентная микроскопия. Традиционно в этой технике используются органические красители, квантовые точки, комплексы переходных металлов и различные флуоресцентные белки в качестве люминофоров. Несмотря на обилие люминофоров поиск новых, лучших по каким-либо параметрам материалов для люминесцентной микроскопии представляется актуальным.

В последние десятилетие в качестве материалов для люминесцентной микроскопии стали использовать апконверсионные наночастицы (АКНЧ, UCNP — upconversion nanoparticles), которые представляют собой нанокристаллы, допированные ионами редкоземельных элементов. Созданные таким образом наночастицы поглощают ИК излучение и каскадным образом передают энергию на редкоземельные ионы, которые, в свою очередь, излучают в видимом диапазоне. Типичная матрица —  $\beta\text{-NaYF}_4$ . Однако ионы натрия и фтора могут оказать существенное влияние на протекание биохимических процессов в клетках. Поэтому мы синтезировали наночастицы на основе матрицы  $\text{YVO}_4$ , биологическая и химическая инертность которых, а также форма наночастиц предполагают низкую токсичность готовых люминесцентных материалов.

Наночастицы были синтезированы гидротермальным методом: соли Y, Yb и Er смешивались с водным раствором  $\text{Na}_3\text{VO}_4$ , при этом аморфные наночастицы  $\text{YVO}_4\text{:Yb,Er}$  выпадали в виде осадка. Чтобы превратить аморфные наночастицы в нанокристаллы, осадок просушивался и смешивался с золь-гелем тетраэтилсилоксана. После отвердевания золь-геля под действием этилового спирта формировалась кремниевая мезопористая сетчатая структура, которая предотвращала спекание наночастиц в процессе кристаллизации. После кристаллизации (10 мин при  $1000^\circ\text{C}$ ) кремний растворялся плавиковой кислотой, а нанокристаллы промывались водой и осаждались центрифугированием. Контроль полученных наночастиц осуществлялся с помощью сканирующей электронной микроскопии и конфокальной люминесцентной микроскопии.

## Особенности электронной структуры полианилина и композитов ПАНИ/Ме (Cu, Zr): исследования методами рентгеновской и УФ-видимой спектроскопии

Недоедкова Ольга Вадимовна

Лысенко Виктория Юрьевна

Южный федеральный университет

Шматко Валентика Анатольевна, к.ф.-м.н., Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.

[nedoedkova@sfedu.ru](mailto:nedoedkova@sfedu.ru)

Материалы на основе органических веществ, имеющие высокую электропроводность, используют для электронных и наноэлектронных устройств (полевых транзисторов, органических солнечных элементов с высокой эффективностью, химических сенсоров). Одним из таких материалов является полианилин (ПАНИ) – самый распространенный представитель класса проводящих полисопряженных полимеров, обладающих собственной проводимостью. ПАНИ представляет собой полимер, состоящий из окисленных и восстановленных фрагментов. В зависимости от степени окисления различают 3 основные формы ПАНИ: полностью окисленная форма ПАНИ – пернигранилин, полностью восстановленная форма ПАНИ – лейкоэмеральдин, ПАНИ с соотношением окисленных и восстановленных фрагментов, равным 1:1 – эмеральдин. Кроме того, варьировать проводящие свойства полианилина, в основе которых лежит его электронная структура, можно путем модификации полимера различными соединениями, в частности солями металлов.

Атомная и электронная структура различных форм полианилина и композитов на его основе ПАНИ/Cu и ПАНИ/Zr исследована спектральными методами: УФ и видимой спектроскопии, рентгеновской спектроскопии поглощения. Образцы для исследования получены бескислотным методом с последующим термостатированием [1].

Наличие двух полос на УФ-спектрах, соответствующих аминной и хинониминной формам, позволяет сделать вывод, что полианилин в исследуемых образцах находится в частично окисленном состоянии. Легирование полианилина дигидрохлоридом меди и оксидом-дихлоридом циркония привело к смещению полос поглощения, что свидетельствует об изменении формы полианилина в ПАНИ/Cu. Анализ изменений в оптических спектрах ПАНИ и композитов ПАНИ/Zr показал, что чистый ПАНИ находится в форме основания эмеральдина, композиты ПАНИ-Zr при температурах термостатирования 30 °C и 90 °C, имеют одинаковую степень окисления.

Исследование особенностей атомной и электронной структуры различных форм PANI и PANI/Zr проводилось на основе квантово-химических расчетов методом теории функционала электронной плотности и теоретического моделирования спектров рентгеновского поглощения за К-краем углерода с использованием программного комплекса FDMNES. Проведенный расчет плотности электронных состояний (рис. 1), полученных цепочек форм полианилина, показал, что наименьшая ширина запрещенной зоны у эмеральдина, и она примерно равна 0,4 эВ, у лейкоэмеральдина 1,8 эВ, у пернигранилина 0,9 эВ. Все полученные значения соответствуют полупроводникам. Для полианилина характерно наличие незанятых состояний до уровня Ферми.

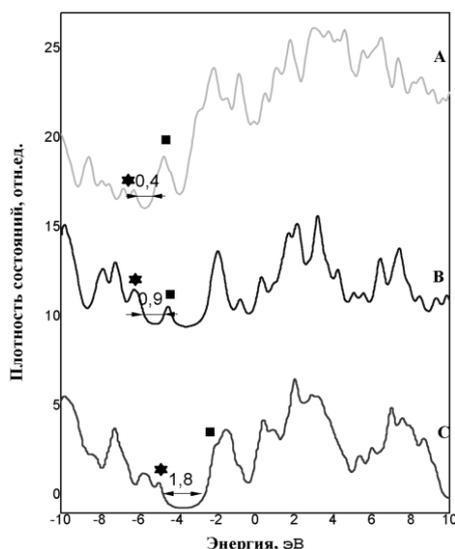


рис. 1 - Плотности электронных состояний: А - эмеральдин, В - пернигранилин, С – лейкоэмеральдин

В ходе геометрической оптимизации композита ПАНИ/Zr при помощи кватерно-химических расчетов методом теории функционала электронной плотности были получены структурные модели и для них проведены теоретические расчёты спектров поглощения.

На основе анализа спектров NEXAFS установлено, что ПАНИ входит в состав нанокompозита Пани-Zr в форме соли эмеральдина. Присутствие циркония в композите вызывает протонирование эмеральдина. Цирконий взаимодействует с полимерной цепью через атомы азота, это говорит о том, что в композите, полученном бескислотным методом, преобладают положительно заряженные иминные группы.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2022 г., № гр. проекта 121100500084-2.

Список публикаций:

[1] Шматко В.А., Мясоедова Т.Н., Яловега Г.Э. Электронная структура полианилина, модифицированного солями меди и циркония//*Оптика и спектроскопия*. 2020. Вып. 5. Стр.617.

## Влияние нестехиометрии на структуру манганита лантана

*Рудский Даниил Игоревич*

*Сохиев Альберт Хасанович, Москалев Кирилл Геннадьевич, Васко Камповерде Хуан Франсиско*

*Южный федеральный университет*

*Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н; Рудская Анжела Григорьевна, д.ф.-м.н.*

*[rudskiy@sfedu.ru](mailto:rudskiy@sfedu.ru)*

Поиск и исследования различных сложных систем, которые в перспективе могут быть использованы в виде функциональных материалов, является актуальной задачей материаловедения. При этом возникает ряд проблем, связанных с выбором состава, выбором объектов для исследований, а также проблема технологии приготовления объектов для исследований. Важную роль играют методы характеристики материалов по составу, структуре и их свойствам. Среди различных методов характеристики наиболее важными являются методы структурного анализа материалов на всех этапах их создания. Функциональные материалы особенно интересны в областях фазовых переходов, так как в таких областях проявляются экстремальности физических свойств.

Из литературы известно [1], что в первых работах по исследованию твердых растворов  $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$  с замещением ионов La на двухвалентные ионы Ca, Sr, Ba выявлен эффект колоссального магнетосопротивления (КМС). Ярче всего эффект КМС проявлялся в твердых растворах с  $x = 0.2-0.4$ . Обычно эффект КМС связывается с существованием в данных твердых растворах ионов  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$  с концентрациями соответствующими концентрациям ионов  $\text{La}^{3+}$  и ионов типа  $\text{A}^{2+}$ . Соотношения концентраций ионов  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$  определяют механизмы транспортных свойств в магнитных полях.

Приготовление нестехиометрических составов  $\text{La}_{1-x}\text{Mn}_{1-y}\text{O}_{3-z}$  может приводить к формированию кристаллических фаз с ионами  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$  в разных концентрациях в зависимости от исходного состава, вида прекурсоров, а также от термодинамической предыстории создания образцов: температур, времен, атмосферы отжига, которые определяют виды и концентрации дефектов. Предполагается, что свойства таких нестехиометрических составов будут подобны свойствам твердых растворов  $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$  (A – Ca, Sr, Ba и т.д.) нестехиометрических составов.

Твердофазный синтез  $(1-x)\text{LaMnO}_3-x\text{La}_{2/3}\text{MnO}_3$  ( $x = 0 - 1$ ;  $\Delta x = 0.1$ ) из стехиометрической смеси оксидов  $\text{La}_2\text{O}_3$  и  $\text{MnO}_2$  проводили при  $T = 1000$  °C в течение 4-х часов. Полученные на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М (Cu-K $\alpha$ -излучение,  $\theta - 2\theta$ ,  $\Delta 2\theta = 0.02$  °,  $\tau = 2$  с) рентгендифракционные профили образцов при комнатной температуре использовали для РСА и РФА. Определение фазового состава, симметрии структур, а также структурных и атомных параметров проводили с помощью компьютерной программы Powder Cell 2,4, находящуюся в свободном доступе [2]. Для уточнения структурных и атомных параметров использовали модели соединений и исходных оксидов из международных кристаллографических баз данных.

Нестехиометрические составы  $(1-x)\text{LaMnO}_3-x\text{La}_{2/3}\text{MnO}_3$  синтезировали в предположении, что стехиометрический  $\text{LaMnO}_3$  с  $\text{La}^{3+}$  обеспечивает и трехвалентное состояние марганца ( $\text{Mn}^{3+}$ ), а нестехиометрический  $\text{La}_{2/3}\text{MnO}_3$  – четырехвалентное состояние ионов  $\text{Mn}^{4+}$ . Общая химическая формула таких твердых растворов –  $\text{La}_{1-x}(\text{Mn}^{3+}_{1-y}\text{Mn}^{4+}_y)\text{O}_{3-z}$ . Количественные соотношения La:Mn в образцах подтверждены методом рентгеноспектрального анализа на рентгеновском спектрометре EDAX-DX-95. Определение количества связанного в перовскитовой структуре La осуществляли на стадии уточнения атомных структур  $\text{La}_{1-x}\text{MnO}_3$ .

Установлено, что все изучаемые нестехиометрические составы  $\text{La}_{1-x}\text{MnO}_3$  при комнатной температуре характеризуются ромбоэдрической фазой с пространственной группой  $R\bar{3}c$ , а стехиометрический  $\text{LaMnO}_3$  характеризуется орторомбической фазой с пространственной группой  $Rnma$ . Обработка дифракционных профилей образцов  $\text{La}_{1-x}\text{MnO}_3$  позволила уточнить атомные параметры структур, включая позиционные, параметры факторов Дебая–Валлера в изотропном приближении и параметры заселенности позиций атомами La. Выявленная чувствительность профильного фактора недостоверности ( $R_p$ ) к заселенности перовскитовых структур атомами La позволила установить, что «стартовые» концентрации  $(1-x_1)\text{La}$  в перовскитовой структуре повышаются до  $(1-x_2)\text{La}$ . Если считать, что образцы стехиометричны по кислороду ( $z = 0$ ), то предварительная оценка соотношения ионов  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$  в синтезированных образцах показала, что при  $x_2 = 0.03$   $y(\text{Mn}^{4+}) = 0.09$ ; при  $x_2 = 0.05$   $y(\text{Mn}^{4+}) = 0.15$ ; при  $x_2 = 0.06$   $y(\text{Mn}^{4+}) = 0.18$ ; при  $x_2 = 0.08$   $y(\text{Mn}^{4+}) = 0.24$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032), (БА30110/20-3-07ИФ).

Список публикаций:

- [1] Goodenough, J.B. // *Landolt–Börnstein*. 1970. P. 207–262.  
[2] W. Kraus, G. Nolze // *J. Appl. Cryst.* 1996. V. 29. P. 301–303.

## Нанокompозитные тонкие плёнки PbS-ZnS

Сабанова Любовь Александровна

Закирова Раушания Мазитовна, Крылов Петр Николаевич, Федотова Ирина Витальевна

Удмуртский государственный университет

Закирова Раушания Мазитовна, к.ф.-м.н.

[Luba1998sa@gmail.com](mailto:Luba1998sa@gmail.com)

Сульфиды свинца и цинка являются одними из базовых материалов, как в микроэлектронике, так и в оптоэлектронике, продолжая быть в центре внимания исследователей. Особый интерес представляют нанокристаллические и нанокompозитные структуры благодаря проявлению квантоворазмерного эффекта и эффекта поверхности или границы раздела фаз. Наночастицы PbS очень нестабильны в окислительных условиях, и их необходимо стабилизировать [1]. Одна из попыток стабилизировать наночастицы PbS – покрыть их внешней оболочкой из более стабильного компонента. Более того, изменяя состав и размер частиц в системах PbS-ZnS можно варьировать величину запрещённой зоны и эффективного показателя преломления. Такого рода системы имеют практический интерес в плане конструирования новых селективных ИК-излучателей, ИК-фотоприемников и узкополостных оптических фильтров, работающих в ближней ИК-области.

Нанокompозитные плёнки PbS-ZnS были получены методом ВЧ магнетронного распыления на установке Катод-1М. Подложки поочередно проходили над соответствующими мишенями определенное число раз. Напыление PbS проводили при мощности магнетрона 125 Вт, а напыление ZnS – 175 Вт. Предельное давление составляло  $P_{\text{пред}} = 4 \times 10^{-3}$  Па. Напыление проводили на предварительно очищенную стеклянную подложку, в среде аргона при рабочем давлении  $P_{\text{раб}} = 3.6 \times 10^{-1}$  Па. Температура подложек составляла 200 °С.

Соотношения толщин слоев сульфидов свинца  $h_{\text{PbS}}$  и сульфидов цинка  $h_{\text{ZnS}}$  были выбраны таким образом, чтобы можно было реализовать три типа нанокompозитных пленок:

- нанокompозитные пленки PbS-ZnS ( $h_{\text{PbS}} = 8.75$  Å и  $h_{\text{ZnS}} = 7.5, 15$  Å; островковый рост одновременно сульфидов свинца и цинка),
- квантовые точки узкозонного полупроводника в широкозонной матрице ( $h_{\text{PbS}} = 8.75$  Å и  $h_{\text{ZnS}} = 30, 45, 60, 120$  Å; островки сульфидов свинца, закрытые сплошным слоем сульфидов свинца),
- гетероструктуры ( $h_{\text{PbS}} = 140$  Å и  $h_{\text{ZnS}} = 135$  Å; пленки сульфидов свинца и цинка становятся сплошными).

Исследования структуры тонких пленок PbS-ZnS проводили на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3.0. Измерение оптических характеристик выполняли с помощью спектрофотометра СФ-56. Топографию пленок изучали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на исследовательском комплексе Centaur U HR.

Тонкие пленки PbS-ZnS являются текстурированными. Фазовый состав изменяется от PbS (для пленки с  $h_{\text{PbS}} = 8.75$  Å,  $h_{\text{ZnS}} = 7.5$  Å и  $h_{\text{PbS}} = 140$  Å,  $h_{\text{ZnS}} = 135$  Å) до ZnS (для пленок с  $h_{\text{PbS}} = 8.75$  Å,  $h_{\text{ZnS}} = 30-120$  Å) в зависимости от соотношения толщин сульфидов свинца и цинка.

Пленки PbS-ZnS с толщиной слоев  $h_{\text{PbS}} = 8.75 \text{ \AA}$  и  $h_{\text{ZnS}} = 7.5-120 \text{ \AA}$  имеют пропускание  $\sim 75\%$ . Край поглощения смещается в сторону коротких длин волн с ростом толщины слоев ZnS 7.5 до 45  $\text{\AA}$ , при  $h_{\text{ZnS}} = 60$  и 120  $\text{\AA}$  край поглощения слегка смещается в длинноволновую область. Пропускание гетероструктурных плёнок PbS-ZnS меньше 50% и край поглощения является пологим.

Показатель преломления пленок PbS-ZnS  $n$  (на длине волны  $\lambda = 587 \text{ нм}$ ) изменяется от 2.30 до 3.02.

Ширина запрещенной зоны изменяется от 2.54 до 3.77 эВ. Ширина запрещенной зоны для нанокomпозитных пленок PbS-ZnS ( $h_{\text{PbS}} = 8.75 \text{ \AA}$ ,  $h_{\text{ZnS}} = 7.5 \text{ \AA}$ ) имеет значение 2.55 эВ, плёнок, представляющих квантовые точки ( $h_{\text{PbS}} = 8.75 \text{ \AA}$ ,  $h_{\text{ZnS}} = 120 \text{ \AA}$ ) – 3.53 эВ, а гетероструктурных пленок PbS-ZnS ( $h_{\text{PbS}} = 140 \text{ \AA}$ ,  $h_{\text{ZnS}} = 135 \text{ \AA}$ ) – 3.10 эВ.

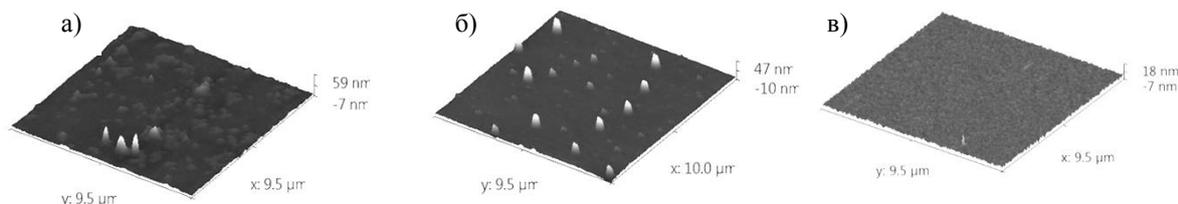


рис. 1 АСМ-изображения поверхности плёнок PbS-ZnS с толщинами  $h_{\text{PbS}} = 8.75 \text{ \AA}$  и  $h_{\text{ZnS}}$ : а) 7.5  $\text{\AA}$ , б) 15  $\text{\AA}$ , в) 60  $\text{\AA}$

На поверхности плёнки PbS-ZnS с толщинами  $h_{\text{PbS}} = 8.75 \text{ \AA}$ ,  $h_{\text{ZnS}} = 7.5 \text{ \AA}$  видны образования неправильной формы высотой до  $\sim 5 \text{ нм}$  и округлые частицы диаметром 2-5 мкм и высотой 20-40 нм (рис. 1). На поверхности пленки PbS-ZnS с толщинами  $h_{\text{PbS}} = 8.75 \text{ \AA}$ ,  $h_{\text{ZnS}} = 15 \text{ \AA}$  наблюдаются только округлые частицы,

более крупные с диаметром  $\sim 5 \text{ мкм}$  и высотой до 40 нм и мелкие – диаметром  $\sim 2 \text{ мкм}$  и высотой до 7 нм. Далее, с ростом толщины  $h_{\text{ZnS}}$  число частиц по количеству и размерам уменьшается, а при  $h_{\text{ZnS}} = 60, 120 \text{ \AA}$  не наблюдаются. На гетероструктурных плёнках частиц также не наблюдается. Т.е. нанокomпозитные и гетероструктурные плёнки PbS-ZnS являются гладкими.

Среднеарифметическая шероховатость  $R_a$  уменьшается при переходе типа плёнок от нанокomпозитных к гетероструктурам.  $R_a$  изменяется от 2.25 до 0.90 нм с ростом толщины  $h_{\text{ZnS}}$  от 7.5 до 120  $\text{\AA}$  при  $h_{\text{PbS}} = 8.75 \text{ \AA}$ . Для гетероструктурной плёнки ( $h_{\text{PbS}} = 140 \text{ \AA}$ ,  $h_{\text{ZnS}} = 135 \text{ \AA}$ )  $R_a$  имеет значение 1.04 нм.

Список публикаций:

[1] Serrano T., Vazquez A., Gómez I. // *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2013. Т. 47. № 2. P. 102.

## Оптические свойства многослойных плёнок CdS-PbS

*Сабанова Любовь Александровна*

*Иванова Дарья Александровна, Крылов Петр Николаевич,  
Закирова Раушания Мазитовна, Федотова Ирина Витальевна*

*Удмуртский государственный университет*

*Закирова Раушания Мазитовна, к.ф.-м.н.*

*[luba1998sa@gmail.com](mailto:luba1998sa@gmail.com)*

Плётки твёрдых растворов замещения в системе CdS-PbS востребованы в качестве фоточувствительных материалов ждя видимой и ИК областей спектра. Их используют в датчиках температурного контроля технологических процессов, спектрофотометрии, приборах экологического мониторинга, они перспективны в качестве преобразователя солнечного излучения [1].

Многослойные плётки CdS-PbS получены методом ВЧ магнетронного распыления на модернизированной установке Катод-1М. Предельное давление составляло  $4.8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ . Распыление проводили в среде аргона при рабочем давлении  $3.6 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ . Температура подложек поддерживалась  $200^\circ\text{C}$ . Осаждение проводили на предварительно очищенные подложки из стекла и кварца. Подложки поочерёдно проходили определённое число раз над мишенями PbS и CdS. Мощность разряда мишени PbS составляла 125 Вт, ZnS – 200 Вт.

Пленки представляли собой многослойные структуры из чередующихся слоев PbS и CdS. Количество пар слоев менялось, так чтобы теоретически рассчитанная толщина составляла 4500 Å. Были получены плёнки, у которых толщина подслоев PbS составляла 5 Å, а толщина подслоев CdS составила 12, 24, 36, 48, 72, 96 и 192 Å. Исследовали оптические свойства и структуру многослойных плёнок CdS-PbS.



рис. 1. Спектры пропускания многослойных структур CdS-PbS с толщиной подслоев CdS: 1 – 12

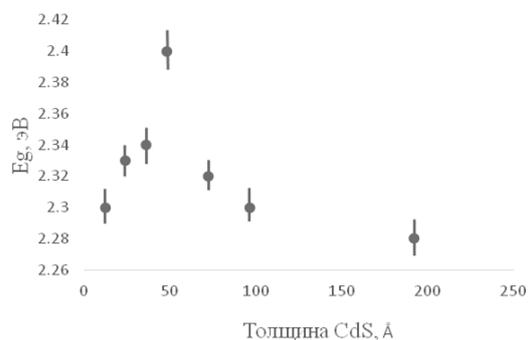


рис. 2. Зависимость ширины запрещённой зоны многослойных структур CdS-PbS от толщины подслоев CdS

Спектры пропускания плёнок CdS-PbS получены на спектрофотометре СФ-56. Пропускание плёнок 65-75%, с увеличением толщины подслоев CdS прозрачность пленок увеличивается (рис. 1). Пропускание плёнок CdS-PbS с толщиной подслоя CdS 12 Å 60% и имеет пологий край поглощения, происходит сдвиг пропускания в сторону больших длин волн и уменьшение окна прозрачности пленок.

По спектрам пропускания были определены дисперсии показателя преломления  $n$ , а по краю поглощения методом Тауца – ширина запрещенной зоны  $E_g$ . Главные показатели преломления  $n_d$ ,  $n_F$ ,  $n_c$  многослойных плёнок CdS-PbS уменьшаются с ростом толщины подслоев CdS. Ширина запрещённой зоны плёнок увеличивается от 2.30 до 2.40 эВ с увеличением толщины подслоев CdS от 12 до 48 Å, а затем с ростом подслоев CdS до 192 Å уменьшается до 2.30 эВ.

Рентгенодифракционный анализ проводили на автоматизированном рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 в Fe-Kα излучении. Многослойные плёнки являются текстурированными с преимущественной ориентировкой кристаллитов вдоль направления [111], перпендикулярного к поверхности образца.

Размеры ОКР пленок PbS-CdS увеличиваются от 99 до 238 Å при росте толщины подслоя CdS до 36 Å, далее убывают до 80 Å при росте толщины подслоя до 192 Å.

#### Список публикаций

[1] Кирсанов А.Ю., Марков В.Ф., Маскаева Л.Н. Прогнозирование состава твёрдых растворов  $Cd_xPb_{1-x}S$  моделированием процесса соосаждения сульфидов свинца и кадмия. Вестник ЮУрГУ, Серия Химия, 2013, т.5, №1, с. 35-39.

## Сравнительное исследование закономерностей избирательной коррозии бинарных наночастиц

Савина Ксения Геннадьевна

Григорьев Роман Евгеньевич, Богданов Сергей Сергеевич

Тверской государственный университет

Сдобняков Николай Юрьевич, к.ф.-м.н.

[kseniya.savina.g@yandex.ru](mailto:kseniya.savina.g@yandex.ru)

Известно, что наиболее характерные морфологии, которые могут создаваться с помощью избирательной коррозии (ИК), отвечают структурам «ядро-оболочка», «полое ядро-оболочка», и пористые наночастицы. Ранее нами в [1, 2] исследовались закономерности ИК в бинарных наночастицах Au-Ag и Cu-Pt. Однако остается не вполне ясной роль ИК в формировании структур «ядро-оболочка»: усиливает ли ИК тенденцию к самоорганизации такого рода структур, связанную с поверхностной сегрегацией. Кроме того, предстоит еще выяснить роль размерного несоответствия атомов и различия между значениями энергии связи компонентов.

Целью данной работы является выяснение закономерностей избирательной коррозии в бинарных наночастицах Ni-Al, а также проведение сравнительного анализа особенностей, характерных именно для

данной бинарной системы, по сравнению с изученными нами ранее [1, 2] (см. рис. 1). В качестве потенциала взаимодействия выбран потенциал сильной связи [3]. Перекрестные параметры находились по правилу Лоренцо-Бергло, апробированного, например, в [4]. На рис. 2 и 3 представлена эволюция энергетических и геометрических параметров бинарной наночастицы Ni1500-Al1500 в процессе избирательной коррозии. Установлено, что для бинарной системы Ni-Al удельная потенциальная энергия увеличивается в процессе моделирования, при этом сохраняется кристаллическая структура конечной наночастицы, в то время как для бинарных наночастиц Au-Ag [1] наблюдался процесс деградации поверхности и образование поверхностных дефектов, а для бинарных наночастиц Cu-Pt [2] наблюдались потеря кристалличности и глубокие объемные дефекты в сочетании с уменьшением удельной потенциальной энергии при удалении атомов.

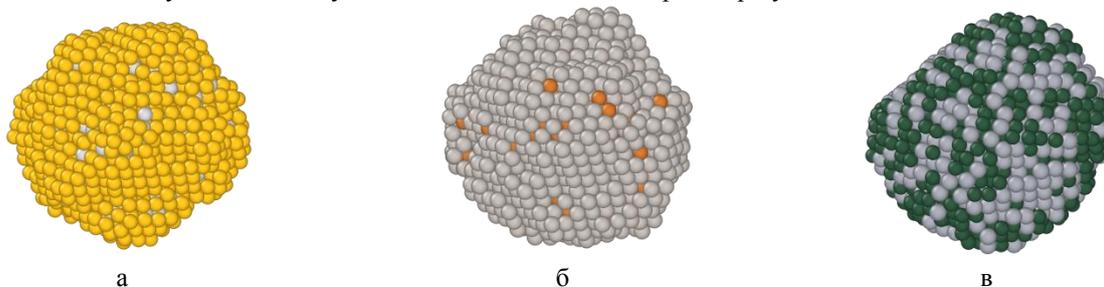


рис. 1. Сравнение конечной структуры бинарных наночастиц в процессе избирательной коррозии: а – Au-Ag (желтые атомы – Au, светло-серые – Ag), б – Cu-Pt (оранжевые – Cu, серые – Pt), в – Ni-Al (темно-зеленые – Ni, серо-голубые – Al).

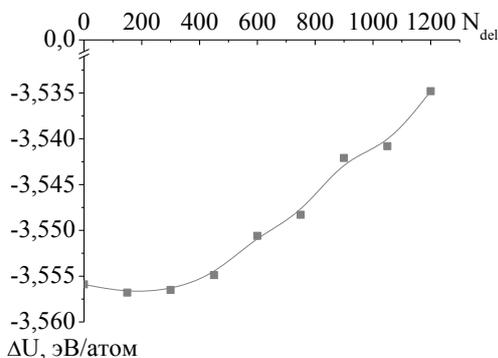


рис. 2. Изменение удельной потенциальной энергии нанокластера Ni-Al при избирательной коррозии.

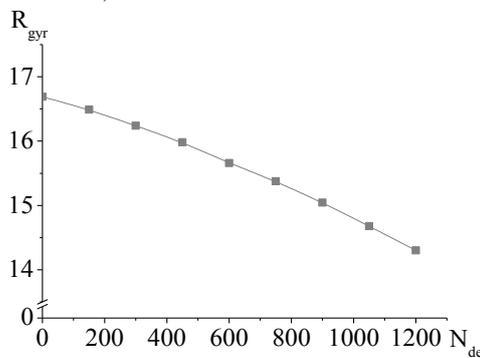


рис. 3. Зависимость радиуса гирации нанокластера Ni-Al при избирательной коррозии.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 20-33-90192).

#### Список публикаций:

- [1] Мясниченко В.С., Самсонов В.М., Сдобняков Н.Ю. и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2019. Вып. 11. С. 487.  
 [2] Sdobnyakov N.Yu., Samsonov V.M., Kolosov A.Yu. et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1658. P. 012048.  
 [3] Cleri F., Rosato V. // Physical Review B. 1993. V. 48. I. 1. P. 22.  
 [4] Сдобняков Н.Ю., Колосов А.Ю., Богданов С.С. Моделирование процессов коалесценции и спекания в моно- и биметаллических наносистемах. Монография. Тверь: ТвГУ, 2021. 168 с.

## Механизмы роста графенового слоя при термическом газофазном осаждении на меди

**Смовж Дмитрий Владимирович**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

[smovzh@itp.nsc.ru](mailto:smovzh@itp.nsc.ru)

Графен один из самых перспективных материалов современного мира. В настоящий момент сфера его применения в реальных секторах экономики не очень высока, но все прогнозы предсказывают экспоненциальный рост в ближайшие несколько лет. В современной научной литературе экспериментально апробированы прототипы большинства бытовых устройств с использованием графена или его производных. Широкий спектр возможных применений обусловлен возможностью контроля свойств графенового слоя

управлением параметрами при росте и путем обработки графеновых материалов после синтеза. К наиболее актуальным задачам синтеза графенового слоя относятся вопросы контроля размера кристалла, количества дефектов, скорости роста и взаимодействия графенового слоя с каталитической подложкой.

В настоящем докладе представлен узкий класс теплообменных устройств на основе графен-полимерных композитов. Сформулированы требования к параметрам графенового покрытия и обсуждены способы их достижения в современной технологии химического осаждения. Описаны способы контроля скорости формирования зародышей кристаллической фазы, скорости роста 2D графенового кристалла, контроля количества графеновых слоев и их взаимодействия с каталитической подложкой, на базе экспериментальных результатов полученных в Институте теплофизики СО РАН. В заключении представлена дорожная карта развития графеновой индустрии в мире и России.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00213).

## Исследование физико-механических характеристик поверхностных слоев чугунов СЧ-20, ВЧ-40

*Яникаева Полина Эрнстовна*

*Шушков Андрей Александрович*

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова*

*Удмуртский федеральный исследовательский центр УРО РАН*

*Шушков Андрей Александрович, к.т.н.*

*[yanikaeva.polia@yandex.ru](mailto:yanikaeva.polia@yandex.ru)*

На сегодняшний день физические, механические свойства чугунов СЧ-20 и ВЧ-40 на макро уровне полностью исследованы [1,2]. Однако изучению физико-механических характеристик чугунов СЧ-20 и ВЧ-40 в приповерхностных слоях до 200 нм не уделено должного внимания. Важным является рассмотрение физико-механических свойств чугунов СЧ-20 и ВЧ-40 на микро, и особенно, на нано уровне, так как во многих изделиях на основе изучаемых образцов именно поверхностный слой представляет собой рабочую поверхность, которая в большей степени подвержена коррозии и механическим деформациям. Выявление физико-механических характеристик чугунов СЧ-20 и ВЧ-40 в нано масштабе является скачком для усовершенствования области применения исследованных образцов в деталях, используемых в области нанотехнологий. Поэтому тема работы актуальна. Самым распространенным способом исследования механических характеристик поверхностных слоев материалов и тонких пленок является метод наноиндентирования [3].

Изучены физико-механические характеристики поверхностных слоев до 200 нм чугунов марок СЧ-20 и ВЧ-40. На некоторых участках исследуемой поверхности двух образцов обнаружена «сильно твердая» фаза с одинаковыми «большими» значениями твердости, по сравнению со средними значениями твердости самих образцов. Среднее значение твердости, исследуемой «сильно твердой» области образца ВЧ 40  $H_{ВЧ\ 40} = 34,71 \pm 12,23$  ГПа, СЧ 20  $H_{СЧ\ 20} = 34,57 \pm 14,56$  ГПа. Выявлено среднее значение твердости образца СЧ 20 без учета областей с «сильно твердой» фазой  $H_{СЧ\ 20} = 8,96 \pm 6,93$  ГПа, что на 65 % выше среднего значения твердости образца ВЧ 40  $H_{ВЧ\ 40} = 5,43 \pm 2,57$  ГПа, также без учета областей с «сильно твердой» фазой (рис. 1).

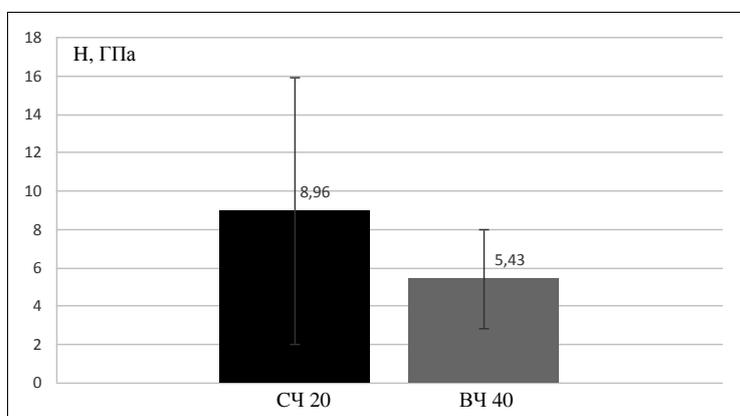


рис. 1. Средние значения твердости  $H$ , (ГПа) образцов чугуна СЧ 20, ВЧ 40 без учета значений «сильно твердой» фазы

По результатам проведенных испытаний выявлено что, поверхность образца чугуна ВЧ 40 немного более пластична, а именно на 9 % по сравнению с образцом СЧ-20 без учета значений «сильно твердой» фазы.

Средние значения приведенного модуля упругости образцов СЧ 20 и ВЧ 40 без учета «сильно твердой» фазы практически одинаковы  $E_{r\text{ СЧ }20, \text{ ВЧ }20} \approx 200 \pm 55 \text{ ГПа}$ , с разницей в 5 %.

Обнаружено, что результаты исследований твердости на нано уровне, а именно отношение твердости образца СЧ-20 к твердости образца ВЧ-40 совпадает с отношением, измеренным по Роквеллу на макро уровне.

Список публикаций:

[1] Балакин С.М., Беляева Л.А., Хлямов Н.А., Петров В.А. Термоциклическая прочность чугуна СЧ 20 при высокотемпературных теплосменах // Вопросы материаловедения. 2020. № 2 (102). С. 50-61.

[2] Болдырев Д.А., Попо Л.И., Прасолов С.Г., Давыдов С.В. О качественной идентификации чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом // Литейщик России. 2019. № 11. С. 20-25.

[3] Шушков А.А., Вахрушев А.В. Методы определения механических свойств наноструктур // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 1. С. 57-71.

## 17 - Радиофизика. Электроника

Алибай Темирулан Талгатулы, аспирант  
Нур-Султан, Евразийский национальный университет им. Гумлева, Башкирский государственный университет,  
Физико-технический институт

### **Сканирующая туннельная микроскопия гомонуклеотидов**

Бахтизин Рауф Загидович, д.ф.-м.н.

e-mail: [temirulanlibay@gmail.com](mailto:temirulanlibay@gmail.com) стр. 143

Ахметов Рамиль Ранисович, 4 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

### **Исследование зависимости времени прогрева раствора ДНК на качество получаемых АСМ-изображений**

Шарипов Талгат Ишмухаметовича, к.ф.-м.н.

e-mail: [ramil.akhmetov@mail.ru](mailto:ramil.akhmetov@mail.ru) стр. 144

Бармин Никита Михайлович, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

### **Изучение систем и моделирование абонентской станции спутниковой связи Ku диапазона**

Кобрин Константин Васильевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [niki.barmin@yandex.ru](mailto:niki.barmin@yandex.ru) стр. 145

Гаптрахманова Виктория Андреевна, магистрант 2 года обучения

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Физический

### **Полосно-пропускающий волноводный фильтр: способ реализации фильтра на тонких резонансных окнах со сложной апертурой**

Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

e-mail: [gaptr@yandex.ru](mailto:gaptr@yandex.ru) стр. 147

Исхакова Виктория Шамилевна, 3 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

### **Изучение поверхности пиролитического графита с использованием сканирующего туннельного микроскопа**

Шарипов Талгат Ишмухамедович, к.ф.-м.н.

e-mail: [yikaishakova235@yandex.ru](mailto:yikaishakova235@yandex.ru) стр. 148

Кузьмин Георгий Вадимович, 4 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт

### **Разработка устройства сбора и передачи данных с датчиков температуры и влажности на ЖК дисплей**

Шарипов Талгат Ишмухаметович, к.ф.-м.н.

e-mail: [georgkuz2000@mail.ru](mailto:georgkuz2000@mail.ru) стр. 149

Лазарева Анна Эдуардовна, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

### **Результаты исследования вариаций критических частот по данным вертикального зондирования**

Радио Любовь Петровна, к.ф.-м.н.

e-mail: [anna.anla.lazareva@mail.ru](mailto:anna.anla.lazareva@mail.ru) стр. 151

Михайлов Максим Александрович, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

### **Электродинамический анализ и синтез полосно-пропускающего фильтра выполненного по SIW-технологии**

Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

e-mail: [mikhailov.maksim.r@mail.ru](mailto:mikhailov.maksim.r@mail.ru) стр. 152

Некрасова Татьяна Вячеславовна, 4 курс

Уфа, Башкирский государственный университет, радиофизики

### **Исследование зависимости размеров кластеров асфальтенов от концентрации асфальтенового раствора**

Шарипов Талгат Ишмухамедович, к.ф.-м.н.

e-mail: [drakon2000bel@gmail.com](mailto:drakon2000bel@gmail.com) стр. 154

Нестеров Вадим Юрьевич, аспирант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Волноводный частотный разветвитель на основе отбора отражённой волны**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [Vadnesterov@sfedu.ru](mailto:Vadnesterov@sfedu.ru) стр. 155

Панова Анастасия Владимировна, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Радиоизлучение пьезокерамики ЦТСЛ**  
Сидоренко Евгений Никифорович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [nastya.shaprinskaya@mail.ru](mailto:nastya.shaprinskaya@mail.ru) стр. 156

Сдобнова Варвара Павловна, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Электродинамический анализ и синтез метаволноводного полосно-пропускающего фильтра**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [sdobnova@sfedu.ru](mailto:sdobnova@sfedu.ru) стр. 158

## Сканирующая туннельная микроскопия гомонуклеотидов

<sup>2</sup>Алибай Темирулан Талгатулы

<sup>1</sup>Шарипов Талгат Ишмухамедович

<sup>1</sup>Кудояров Данил Шамилевич

<sup>1</sup>Муллагалиев Ильнур Наилевич

<sup>2</sup>Нурахметов Турлыбек Нурахметови

<sup>1</sup>Бахтизин Рауф Загидович

<sup>1</sup>Башкирский государственный университет

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева

Бахтизин Рауф Загидович, д.ф.-м.н.

[temirulanalibay@gmail.com](mailto:temirulanalibay@gmail.com)

В настоящее время в мире активно развивается область микро- и наноэлектроники. Активно исследуется применение дезоксирибонуклеиновых (ДНК) нанопроводов в микроэлектронике. До сих пор не ясно, какие электрические свойства присущи молекулам ДНК. Перенос заряда вдоль молекул ДНК привлекает внимание исследователей вот уже более пятидесяти лет.

Нами методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) были исследованы три разновидности синтезированных ДНК-последовательностей, называемых гомонуклеотидами, каждый из которых состоял из двенадцати нуклеотидов только одного вида: из тимина ( $dT_{12}$ ), из цитозина ( $dC_{12}$ ) и из аденина ( $dA_{12}$ ). Эти гомонуклеотиды были синтезированы в Институте биохимии и генетики УФИЦ РАН.

Гомонуклеотиды наносились на подложку в виде капли раствора. В качестве подложек применяли серебро, термически напыленное в вакууме на поверхность слюды на вакуумной установке ВУП-5. СТМ исследования проводили в атмосфере воздуха при комнатной температуре на приборе Solver P47 (производство ОАО «НТ-МДТ Спектр Инструментс, г. Зеленоград, Россия) в режиме постоянного туннельного тока. Для сканирования использовался вольфрамовый зонд, острие которого получено методом травления в растворе NaOH. На рисунке 1 показано изображение острия зонда, полученное оптическим микроскопом. Сначала с помощью СТМ исследовали поверхность напыленного серебра и получили СТМ-изображение (рисунок 2). Затем в режиме сканирующей туннельной спектроскопии была получена вольтамперная характеристика (ВАХ) серебряной пленки (рисунок 3).



рис.1. Изображение острия вольфрамового зонда, полученное оптическим микроскопом.

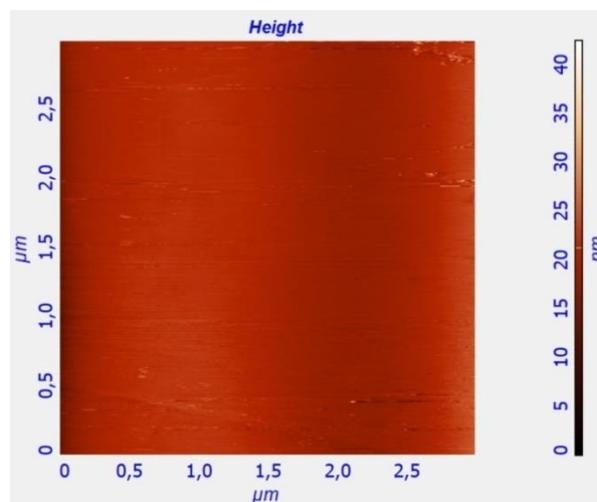


рис.2. СТМ-изображение поверхности серебра, напыленного на слюдяную подложку.

На поверхности серебра наносили капли растворов гомонуклеотидов  $dA_{12}$ ,  $dC_{12}$  и  $dT_{12}$ , сушили на воздухе и приступали к сканирующей туннельной спектроскопии. На рисунке 4 показана кривая ВАХ гомонуклеотидов  $dA_{12}$ . Из кривой видно, что в целом проводимость гомонуклеотида по сравнению с проводимостью серебряной пленки значительно ниже. На следующем рисунке представлена ВАХ гомонуклеотидов  $dC_{12}$  (рисунок 5). По сравнению с ВАХ  $dA_{12}$  характер кривой тока существенно изменился. Наблюдается плато с силой тока близкой к нулю мА в диапазоне напряжений от  $-0,9$  В до  $+1,3$  В.

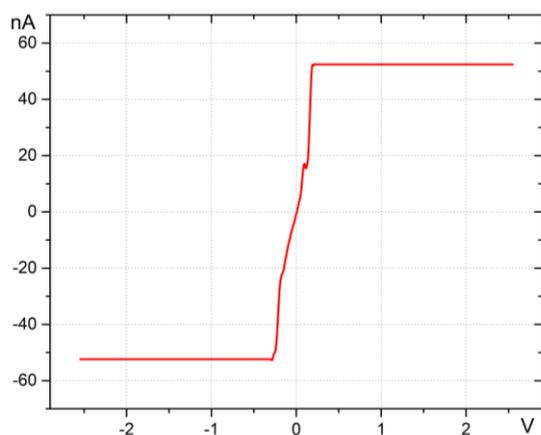


рис.3. ВАХ серебряной пленки

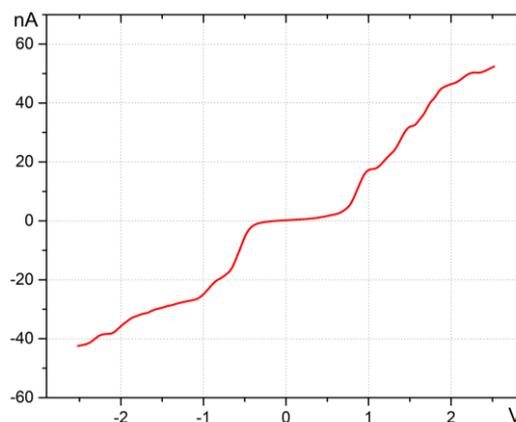


рис.4. ВАХ гомонуклеотидов dA12

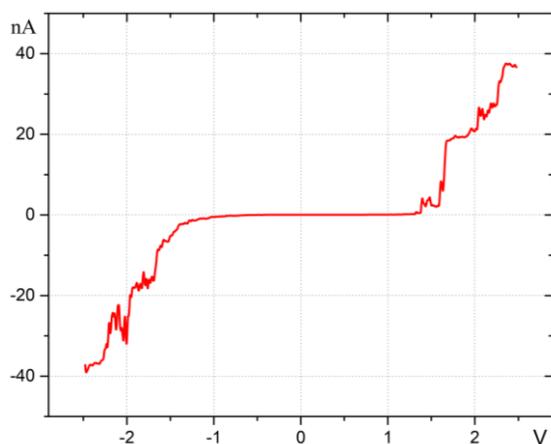


рис.5. ВАХ гомонуклеотидов dC12

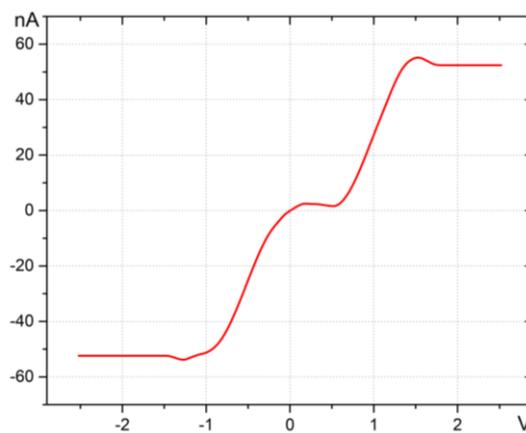


рис.6. ВАХ гомонуклеотидов dT12

На рисунке 6 представлена ВАХ гомонуклеотидов dT<sub>12</sub>. Общий характер кривой ВАХ для dT<sub>12</sub> показывает сходство с ВАХ для dA<sub>12</sub>. Однако, проводимость гомонуклеотидов dT<sub>12</sub> видимо выше, чем у dA<sub>12</sub>, поскольку наблюдается ненулевая сила тока уже при обратных напряжениях чуть больше нуля вольт, а также кривая имеет более крутой характер как в области обратных, так и прямых напряжений. Заметим, что микроскоп позволяет измерять ток в диапазоне от 50 мА до -50 мА. В связи с этим, не стоит рассматривать плато, которое наблюдается (рисунок 6) при значениях силы тока 50 мА и -50 мА, как насыщение тока.

Полученные ВАХ по всем трем видам гомонуклеотидов пока имеют низкую воспроизводимость и не дают нам возможность с уверенностью делать какие-либо выводы.

## Исследование зависимости времени прогрева раствора ДНК на качество получаемых АСМ-изображений

*Ахметов Рамиль Ранисович*

*Шарипов Талгат Ишмухаметович*

*Башкирский государственный университет*

*Шарипов Талгат Ишмухаметович, к.ф.-м.н.*

*[ramil.akhmetov@mail.ru](mailto:ramil.akhmetov@mail.ru)*

В настоящее время атомно-силовая микроскопия (АСМ) является одним из основных методов исследований в нанофизике. Она позволяет выполнять экспериментальные исследования на наномасштабном уровне. АСМ позволяет исследовать топографию различных объектов, в том числе наноструктур [1, 2], а также изучать их свойства [3]. Объектами могут служить как твердотельные материалы, так и биологические объекты различной природы, а именно от биополимерных молекул до клеток, вирусов и бактерий.

Одним из важнейших и, возможно, наиболее часто исследуемых биомолекул являются молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Молекулы ДНК являются одним из перспективных материалов для

нанoeлектроники, поскольку могут играть роль нанопроводов благодаря своим уникальным размерам: при диаметре всего 2 нм их длина может достигать несколько единиц микрон. Для изучения физических свойств молекулы ДНК, а именно электропроводности, необходимо научиться осаждать отдельные молекулы на поверхность гладкой подложки в единичном состоянии с тем, чтобы была возможность беспрепятственно подвести электрические контакты к концам исследуемой молекулы и пропустить через нее электрический ток. Поэтому перед нами ставилась первоначальная задача - получить качественное изображение молекул ДНК, осажденных на подложку из слюды.

В работе исследовалось два образца, отличающихся способом приготовления. Образец №1 был приготовлен следующим образом. Мы взяли раствор ДНК с концентрацией  $23,7 \cdot 10^{-5}$  М и разбавили его бидистиллированной водой milli-Q до получения концентрации  $23,7 \cdot 10^{-7}$  М. После этого эппендорф с раствором встряхивали для перемешивания и прогревали в течение 45 сек при температуре 80 °С с целью деглобулизации. Затем 12 мкл полученного раствора наносили на свежий скол слюды. И сушили в атмосфере воздуха в течение 90 мин. После чего исследовали на атомно-силовом микроскопе NtegraPrima в полуконтактном режиме с кантилевером жесткостью 11,5 Н/м.

Образец №2: эппендорф с раствором ДНК в той же концентрации, что и образец №1, прогревали теперь в течение 90 сек. Затем 12 мкл полученного раствора наносили на свежий скол слюды, сушили в атмосфере воздуха в течение 120 мин. После чего исследовали на атомно-силовом микроскопе при тех же условиях.

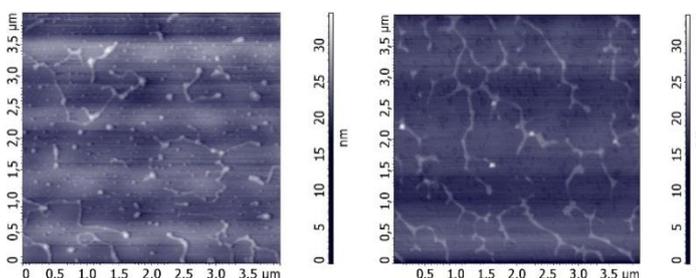


рис. 1. АСМ-изображение образца №1 (а) и образца №2 (б).

На полученных АСМ-изображениях отчетливо визуализируются как глобулы, так и отдельные «ниточки» молекул ДНК. Поверхностная плотность глобул на АСМ-изображении образца №2 (рис. 1б) значительно меньше, чем на АСМ-изображении образца №1 (рис. 1а). На АСМ-изображении образца №2 форма молекул имеет резкие изломы (вместо изгибов «нитей» образца №1) и прямолинейные участки. Объяснения этому пока найти не удалось.

Список публикаций:

- [1] T I Sharipov, S. Santer, A. Kopyshv, I T Amangulova, R Z Bakhtizin. Scanning probe microscopy/spectroscopy of oligonucleotides with a homonucleotide sequence. // Fifth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, Vladivostok, Russia, July 30 – August 03, 2020: Proceedings. – Vladivostok : Dalnauka Publishing, 2020. – p.46.
- [2] Шарипов Т.И., Гарафутдинов Р.Р., Бахтизин Р.З. Исследование одноцепочечных ДНК с повторяющейся нуклеотидной последовательностью методами сканирующей зондовой микроскопии. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Том 84. № 5. С. 675-678. DOI: 10.31857/S0367676520050336.
- [3] D. Porath, A. Bezryadin, S. de Vries and C. Dekker, Direct measurement of electrical transport through DNA molecules, Nature 403 (2000) 635-638

## Изучение систем и моделирование абонентской станции спутниковой связи

**К<sub>ц</sub> диапазона**

**Бармин Никита Михайлович**

Южный федеральный университет

Кобрин Константин Васильевич, к.ф.-м.н.

[niki.barmin@yandex.ru](mailto:niki.barmin@yandex.ru)

Основным способом реализации глобальной и региональных сетей связи стало применение спутниковых систем связи (ССС). СССР имеют определенное преимущество при обеспечении универсального широкополосного доступа в Интернет, а также при теле- и радиовещании в малонаселенных районах. Системы на основе низкоорбитальных и геостационарных спутников обеспечивают альтернативное средство подвижной связи для абонентов из любой точки Земли.

Целью данной работы было изучить основы спутниковой связи и разработать модель абонентской станции спутниковой связи (АССС) на базе программы для 3D моделирования «Компас-3D».

В соответствии с [1], в спутниковом телевидении используется  $K_u$  диапазон - диапазон сантиметровых длин волн, простирающийся от 10,7 до 18 ГГц. Поэтому необходимо выбрать из большого выбора производителей соответствующую аппаратуру, предназначенную для модуляции и демодуляции сигнала в этом диапазоне.

В состав абонентской станции входят компоненты: 1) VSAT – терминал спутниковой связи с антенной небольшого размера, менее 2500 мм. 2) Приёмопередающее оборудование, состоящий из полупроводниковый усилитель-передатчик (BUC) и малошумящий усилитель-конвертер (LNB), а также облучатель и полосовой фильтр. 3) Спутниковый модем. 4) Персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ).

Все эти компоненты были смоделированы в системе автоматизированного проектирования работ «Компас-3D», советско-российской разработки.

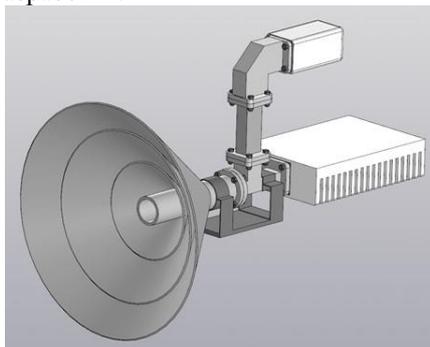


рис 1. Приёмо-передающее устройство

На рисунке 2 представлен расчет параболического зеркала VSAT со следующими параметрами: диаметр параболы 1800 мм, глубина 200 мм, угол раскрыва 95,85°, фокусное расстояние 1012,5 мм.

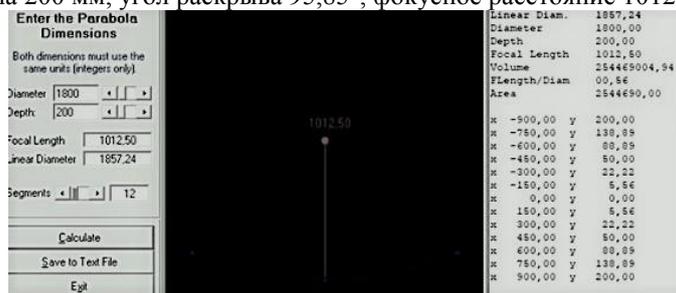


рис.2. Расчет параболического зеркала

Итогом данной работы стало комплексное моделирование и сбор компонентов в единую сборку (рис.3.).

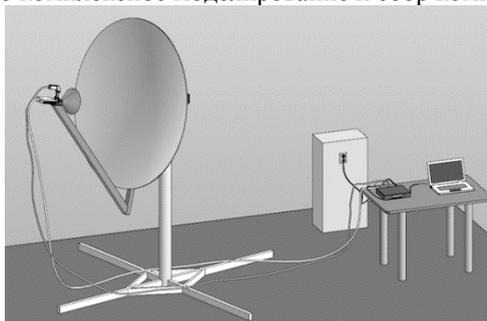


рис.3. Модель станции спутниковой связи

Основой станции является спутниковый модем, модулирующий и демодулирующий радиосигнал, а также преобразующий его в данные компьютерной сети Ethernet. Параболическая антенна фокусирует радиосигналы от спутника на рупор антенно-волноводного тракта. LNB преобразует полученный радиосигнал из  $K_u$ -диапазона в L-диапазон и передает по кабелю в модем. Из модема сигнал передается по кабелю в BUC, в котором преобразуется из L-диапазона в  $K_u$ -диапазон, передается по волноводному тракту в рупор и отражаясь от поверхности антенны на спутник связи. Для управления приема и передачи данных используется ПЭВМ (ноутбук), также смоделированный в программе 3D-моделирования.

В результате проделанной работы был:

1. Осуществлен расчёт параболического зеркала с помощью программы.
2. Были разработаны 3D-модели составных частей в программе «Компас-3D».
3. Собрана 3D-модель АССС.

Список публикаций:

- [1] Сомов А. М. // *Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов.* – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 244 с.: ил
- [2] Усатенко С. Т., Каченюк Т. К., Терехова М. В. // *Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник* – М.: Издательство стандартов, 1989. – 325 с.:ил.
- [3] К. Ротхаммель // *Антенны. Том 1.: Пособие* – М.: «Алоиз Кришке», 2005–412 с.:ил.

## Полосно-пропускающий волноводный фильтр: способ реализации фильтра на тонких резонансных окнах со сложной апертурой

*Гаптраханова Виктория Андреевна*

*Черных Каролина Олеговна*

*Южный федеральный университет*

*Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.*

*[gaptr@yandex.ru](mailto:gaptr@yandex.ru)*

Волноводные фильтры находят широкое применение в современных системах локации, навигации и различных видах связи. Преимуществом такая реализация фильтров являются малые потери при достаточно большой передаваемой мощности.

Для решения проблемы излишней габаритности волноводных фильтров используется переход от классических объемных резонаторов к плоско-поперечным резонаторам. Представленные в работе резонансные окна, позволяют создать компактный и лёгкий фильтр, с несколькими полюсами затухания. Данная реализация позволяет обойтись без каких-либо дополнительных структур[1].

Для построения волноводного фильтра взята сложная структура резонансных диафрагм, в основе которой лежит прямоугольное окно в металлическом экране. Такие окна можно получить путем построения колебательного контура [2]. Резонансные диафрагмы выполнены путем нанесения металлизации на диэлектрическую подложку размером 35x15 мм. Однако, такая реализация вносит дополнительные потери в полосу пропускания от каждой фильтрующей диафрагмы. [3,4].

На рис.1. представлена апертура тонкой металлической резонансной диафрагмы для волновода WR137.

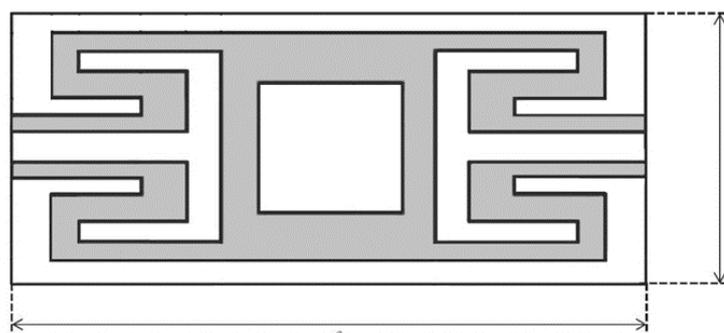


рис.1. Топология резонансной диафрагмы.

Был проведен электродинамический анализ одиночной резонансной диафрагмы и выявлены зависимости параметров диафрагмы от частоты. Резонансные диафрагмы связаны друг с другом четвертьволновыми участками, так что волноводы между резонансными окнами работают как идеальный инвертор [5-9].

Анализ одиночных резонансных диафрагм позволяет спроектировать волноводный фильтр. На рис. 2. приведены результаты моделирования (АЧХ) фильтра третьего порядка в диапазоне частот 5-8 ГГц, на центральной частоте  $f=6.6$  ГГц.

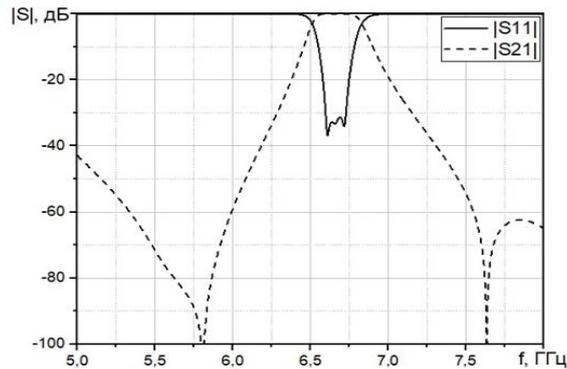


рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика волноводного фильтра третьего порядка.

В данной работе был проведен электродинамический анализ волноводного фильтра, построенного на основе трех металлических резонансных диафрагм, которые имеют резонансную характеристику с двумя полюсами затухания по обе стороны полосы пропускания. Существует возможность дальнейшего развития исследования путем усложнения формы резонансной диафрагмы и увеличения их количества.

Список публикаций:

- [1] *Proceedings of the 36th European Microwave Conference: Masataka Ohira, Hiroyuki Deguchi, and Mikio Tsuji «A Novel Resonant Window Having Dual-Behavior Resonance for Pseudo-Elliptic Waveguide Filter».* 2020.
- [2] Лебедев И. В. *Техника и приборы СВЧ т.1. Изд. Высшая школа, 1970.-440с.*
- [3] M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji, and H. Shigesawa, "Novel waveguide filters with multiple attenuation poles using dual-behavior resonance of frequency-selective surfaces," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 53, no. 11, pp. 3320–3326, Nov. 2005.
- [4] M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji, and H. Shigesawa, "Circuit synthesis for compact waveguide filters with closely-spaced frequency selective surfaces," *10th Int. Symp. on Microwave and Optical Tech., Fukuoka, Japan, Aug. 2005, pp.811–814.*
- [5] C. Quendo, E. Rius, and C. Person, "Narrow bandpass filters using dual-behavior resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* vol. 51, no. 3, pp. 734–743, Mar. 2003.
- [6] C. Quendo, E. Rius, and C. Person, "Narrow bandpass filters using dualbehavior resonators based on stepped-impedance stubs and differentlength stubs," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* vol. 52, no. 3, pp. 1034–1044, Mar. 2004.
- [7] Заргано Г.Ф., Земляков В. В., Крутиев С. В., Клецников А. Б. Волноводный квазиэллиптический фильтр на сложных резонансных диафрагмах // *Физические основы приборостроения.* 2019. Т. 8, № 1. С. 47–54.
- [8] Земляков В.В., Заргано Г.Ф., Крутиев С.В., Тяглов М.Ю. Электродинамический анализ и синтез эллиптического фильтра на сложных резонансных диафрагмах в прямоугольном волноводе // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика.* 2018. Т. 61, № 12. С. 1130–1139.
- [9] Krutiev, S.V., Zemlyakov, V.V., Lonkina, D.V. *Electrodynamics analysis of a band-pass waveguide filter on thin metal complex resonant diaphragms // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2020, 24 September 2020, Pages 190-193*

## Изучение поверхности пиролитического графита с использованием сканирующего туннельного микроскопа

**Исхакова Виктория Шамилевна**  
**Шаринов Талгат Ишмухамедович**

*Башкирский государственный университет*  
*Шаринов Талгат Ишмухамедович, к.ф.-м.н.*  
[vikaishakova235@yandex.ru](mailto:vikaishakova235@yandex.ru)

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) всё чаще привлекает внимание ученых. Ведь появление СЗМ открыло новые возможности для исследования объектов в самых различных областях науки [1].

Высоко ориентированный пиролитический графит (ВОПГ) был выбран объектом нашего исследования, поскольку является одним из немногих образцов, изображение поверхности которого в нанометровом масштабе можно достаточно легко получить даже начинающим ученым в области зондовой микроскопии. А также работать с ВОПГ полезно для получения навыков работы на СЗМ.

В данной работе одним из методов СЗМ, а именно, сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), была исследована поверхность ВОПГ. Принцип работы СТМ основан на явлении туннелирования электронов через

узкий потенциальный барьер между металлическим зондом и проводящим образцом во внешнем электрическом поле.

На поверхности графита часто наблюдаются полосы с высотой 1 – 2 Å и шириной до 100 нм, которые соответствуют рядам частичных дислокаций с вектором Бюргера, лежащим в плоскости графитовых слоев. Полная дислокация в графите расщепляется на две частичных, между которыми образуется дефект упаковки. При сканировании игла может оказывать значительное давление на поверхность, особенно, если процесс сканирования происходит при большом токе (> 1 нА) и маленьком напряжении (< 40 мВ). Под силовым воздействием иглы дислокационные полосы могут перемещаться вдоль поверхности графита [2].

После проведения СТМ-исследований мы получили СТМ-изображения топографии поверхности высоко ориентированного пиролитического графита. На них хорошо идентифицируются специфичные для данного материала поверхностные особенности: ступени и террасы (рис.1). Ступени образуются на поверхности исследуемого образца графита в результате его скола. На поверхности графита наблюдаются многочисленные ступени, высота которых несколько единиц или десятков атомных слоев графита.

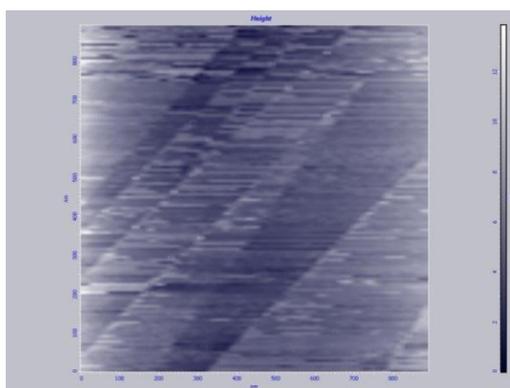


рис. 1. СТМ-изображение фрагмента поверхности ВОПГ.

В результате выполненной работы были получены необходимые навыки работы на микроскопе SolverP47 и изучена топография поверхности ВОПГ. Измерены некоторые геометрические параметры ступеней и террас.

Список публикаций:

[1] Т. Шарипов, А. Копышев, С. Лёбнер, Й. Йелкен, М. Соколовский, П. Арья, Р. Бахтизин, С. Сантер. Влияние условий приготовления образца на структурирование длинных молекул // *Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании : тезисы докладов XI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, 11-14 ноября 2020 г.)* - Уфа: НИЦ «АЭРЕРНА», 2020. - с. 105-106.

[2] В. Синецына, Г.Б. Мешков, О.И. Киселева, И.В. Яминский. *Визуализация атомной решетки графита.*

## **Разработка устройства сбора и передачи данных с датчиков температуры и влажности на ЖК дисплей**

**Кузьмин Георгий Вадимович**

**Шарипов Талгат Ишмухаметович**

**Башкирский государственный университет**

**Шарипов Талгат Ишмухаметович, к.ф.-м.н.**

**[georgkuz2000@mail.ru](mailto:georgkuz2000@mail.ru)**

Разрабатывая данное устройство, собирающее и передающее данные, получаем простую схему, называющуюся метеостанция. Больше всего эта система подходит под домашнюю метеостанцию.

Домашняя метеостанция — это современный измерительный прибор, который следит за изменением микроклимата в помещении и погодой за окном. Устройство состоит из двух отдельных блоков, синхронизированных друг с другом. Основной блок — сама плата и дисплей. На экране отображается информация о температуре и влажности воздуха. Основной блок всегда устанавливают внутри помещения. Второй блок — внешний датчик. Его следует устанавливать снаружи, так как он отвечает за сбор данных.

Для вывода температуры на LCD дисплей с датчика DHT11, мы использовали плату Arduino UNO. И собрали схему, которая показана ниже (рис.1).

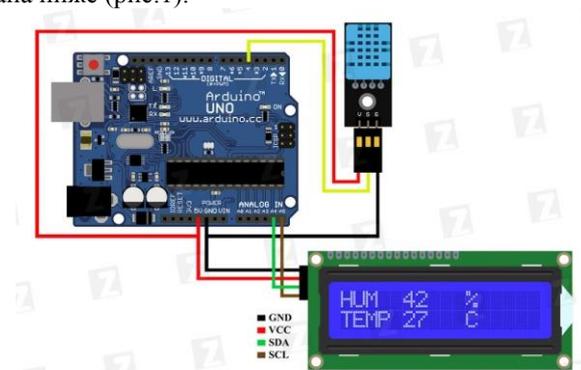


рис.1. Схема подключения устройства

После сборки схемы, загрузили в микроконтроллер скетч.

**Скетч** - это программа, написанная для платформы Arduino и имеющая определенную структуру (рис.2). Скетч обязательно содержит 2 функции: функцию **setup** и функцию **loop**.

Прошивка Arduino при включении вызывает функцию setup. Функция setup вызывается лишь раз, при каждом запуске платы. Это место идеально подходит для инициализации (задания начальных значений) переменных, установки режимов пинов (ввод/вывод), задания соответствия подключенных датчиков/сервоприводов/прочего с пинами. После выполнения функции setup идет циклический вызов функции loop (т.е. сразу после выхода из функции setup, выполняется функция loop, после выхода из неё, она же вызывается снова. Процесс продолжается пока питание не будет отключено.)

```
#include <Wire.h> // Добавляем необходимые библиотеки
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "DHT.h"
#define DHTPIN A0 // к какому пину будет подключен сигнальный выход датчика
//выбор используемого датчика
#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11
//##define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302)
//##define DHTTYPE DHT21 // DHT 21 (AM2301)
//инициализация датчика
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
byte degree[8] = // кодируем символ градуса
{
  000111,
  000101,
  000111,
  000000,
  000000,
  000000,
  000000,
  000000,
};
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // Задаем адрес и размерность дисплея
void setup()
```

рис.2. Скетч

Мы рассмотрели, как сделать простую домашнюю метеостанцию на Arduino UNO с жидкокристаллическим дисплеем 1602a и датчиком температуры и влажности воздуха DHT11. Данную разработку можно доработать, добавив к схеме еще больше датчиков для анализа метеоусловий. Также можно сделать беспроводную метеостанцию на Arduino UNO, используя Bluetooth или радио-модули для передачи информации на расстояние.

Список публикаций:

- [1] Подключение датчика DHT11 к Arduino UNO. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://tsarevstudio.ru/blog/hobby/humidity\\_and\\_temp\\_with\\_dht11\\_and\\_arduino.html](https://tsarevstudio.ru/blog/hobby/humidity_and_temp_with_dht11_and_arduino.html)
- [2] Плата Arduino UNO R3: схема, описание, подключение устройств <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno/>
- [3] Структура скетчей. [Электронный ресурс] [http://zelectro.cc/what\\_is\\_sketch/](http://zelectro.cc/what_is_sketch/)

## Результаты исследования вариаций критических частот по данным вертикального зондирования

*Лазарева Анна Эдуардовна*  
*Южный федеральный университет*  
*Радио Любовь Петровна, к.ф.-м.н.*  
[anna.anla.lazareva@mail.ru](mailto:anna.anla.lazareva@mail.ru)

Одним из наиболее распространённых и эффективных инструментов мониторинга ионосферы является вертикальное зондирование. На основе данных вертикального зондирования можно судить об электронной концентрации ионизированного слоя и его высоте. Одной из главных характеристик ВЗ является критическая частота слоя F2 ( $f_0F2$ ) - максимальная частота, отражающаяся от слоя F2.

Целью данной работы являлась оценка наблюдаемых вариаций критической частоты  $f_0F2$  на основе экспериментальных данных, оценка эффективности прогнозирования критической частоты  $f_0F2$  с помощью Международной справочной модели ионосферы IRI-2016. [1, 2] Используемая база экспериментальных данных – ионограммы вертикального зондирования в пункте Торы (51.81N 103.08E). Продолжительность наблюдения составила 11 дней. Солнечная активность  $W=11$ . Ионограммы снимались круглосуточно с интервалом 15 минут. Объём экспериментальных данных составил 1056 ионограмм. Все ионограммы обрабатывались вручную, что позволяет исключить возможные ошибки автоматической обработки, а, следовательно, увеличивает статистическую значимость полученных результатов исследования.

Результаты измерений обрабатывались в следующей последовательности. Для каждого дня на плоскость «время суток –  $f_0F2$ » наносились все полученные из ионограмм значения  $f_0F2$  (для каждого часа снималось 4 значения  $f_0F2$ ). Таким образом были получены суточные ходы для наблюдаемых дней. Для фиксированных моментов времени находились средние значения  $f_0F2$ . Полученные значения соединялись сплошной кривой, которая представляет собой усреднённый за месяц суточный ход критической частоты слоя F2 (рис. 1). Точками отмечены все измеренные значения  $f_0F2$  за каждый день, а сплошной линией - среднее значение  $f_0F2$  за все дни. По данным такой обработки можно судить о наличии быстрых и медленных флуктуаций, а также оценить вариации  $f_0F2$  ото дня ко дню. Обработка во всех случаях велась без исключения возмущённых условий распространения на трассе.

Для последующей обработки суточные сеансы были разбиты на интервалы по 4 часа каждый: 00:00–04:00, 06:00–10:00, 12:00–16:00, 19:00–23:00. Исходя из обработанных данных, вычислялось скользящее среднее значений  $f_0F2$  с окном 2 ч и шагом следования 15 мин., относящееся к 4-часовому интервалу. На следующем этапе находились среднеквадратичные отклонения (СКО) мгновенных значений  $f_0F2$  от усреднённых  $f_0F2$  со скользящим средним за 2 ч. Среднее значение среднеквадратичных отклонений за 4-часовые интервалы за все дни представлены в таблице:

Временной интервал		00:00-04:00	06:00-10:00	12:00-16:00	19:00-23:00
Среднее значение СКО	МГц	0.02	0.1	0.1	0.02
	%	0.7	2.2	1.3	1.2
Разброс значений $f_0F2$ (вариации ото дня ко дню)	МГц	2.5	3.9	2.5	2.5
	Среднее значение СО				
	МГц	0.6	0.6	0.4	0.3
	%	25.9	20.9	7.1	10.7

По результатам зондирования был найден разброс значений  $f_0F2$ , определяемый как разность между максимальным и минимальным за 4 временных интервала значениями  $f_0F2$  за весь период зондирования. Данные также отражены в таблице.

Далее представляла интерес оценка эффективности прогнозирования критической частоты на базе модели IRI-2016. СО – среднее абсолютное отклонение между значениями  $f_0F2$  после усреднения с окном 2 часа и прогнозом МПЧ (рис. 2). Прогноз выполнялся по данным Международной справочной модели IRI-2016 [1,2]. В таблице приведены значения среднего отклонения (СО) измеренных значений  $f_0F2$  от прогнозируемых со скользящим средним за 2 часа. Эти данные позволяют оценить отклонение прогноза от наблюдаемых значений  $f_0F2$ . Среднее значение отклонения прогнозных значений от наблюдаемых в дневные часы составило 7.1% (0.4 МГц) за все наблюдаемые дни. Максимальная погрешность прогноза наблюдалась в ночное время (25.9%). Минимальные значения (от 2.1 до 14.8 %) приходились на полуденные часы.

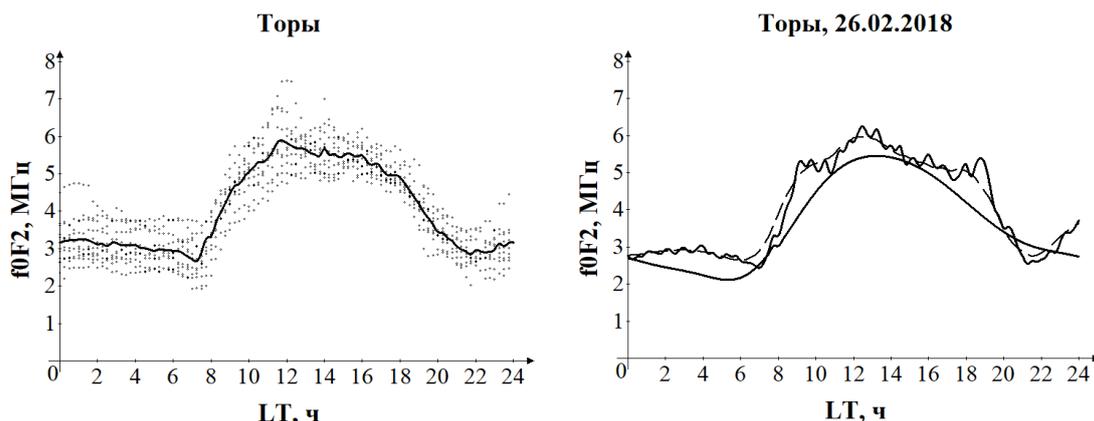


рис.1 Среднемесячный суточный ход; рис.2 Пример суточного хода  $f_0F_2$  ( $f_0F_2$  - тонкая линия, усреднение с окном 2 часа - пунктирная линия, прогноз по IRI-2016 - жирная линия)

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Получены по экспериментальным данным суточные зависимости критической частоты  $f_0F_2$ .
2. Оценены быстрые и медленные вариации  $f_0F_2$ . Отклонения (СКО) мгновенных значений  $f_0F_2$  от усредненных  $f_0F_2$  со скользящим средним за 2 ч составили для ночного времени 0.7%, для дневного-1.3%, для заходного-1.2% и для восходного-2.2% от среднего значения.
3. Вариации ото дня ко дню в пункте вертикального зондирования Торы в дневные часы достигали 2.5 МГц (около 47% от среднего значения).
4. Проведена оценка эффективности использования модели IRI-2016 для прогнозирования критической частоты. Среднее значение отклонения прогнозных значений от наблюдаемых в дневные часы составило 7.1% (0.4 МГц).

Список публикаций:

- [1] *International Reference Ionosphere – IRI (2016)*. URL: [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php).  
 [2] *D. Bilitza, IRI the International Standard for the Ionosphere, Adv. Radio Sci., 16, 1-11, https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018, 2018.*

**Электродинамический анализ и синтез полосно-пропускающего фильтра,  
 выполненного по SIW-технологии**  
*Михайлов Максим Александрович*  
*Южный федеральный университет*  
*Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.*  
[mikhailov.maksim.r@mail.ru](mailto:mikhailov.maksim.r@mail.ru)

Нынешние технологии производства и проектирования интегральных микросхем продолжают открывать способы интегрирования в свою структуру различных трехмерных элементов, таких как прямоугольных волноводов и объемных резонаторов на их основе. Данная технология носит название SIW-технология (Substrate Integrated Waveguides - встроенный в подложку волновод), которая представляет из себя волноподобную структуру, созданную двумя рядами металлических цилиндров, соединяющих две металлические пластины, ограничивающих диэлектрическую подложку.

Особенность SIW-структур заключается в том, что они сохраняют большую часть преимуществ классических волноводов, а именно: большая передаваемая мощность, малые потери, высокая добротность резонаторов, малые размеры и вес, низкая стоимость производства. Важнейшим преимуществом SIW-технологии является возможность интегрировать все компоненты на одной подложке.

В данной работе был проведен электродинамический анализ полосно-пропускающего фильтра и его элементов, выполненного по SIW-технологии в среде CST Studio Suite 2021. Как видно из амплитудно-частотной характеристики фильтр обладает высокой избирательностью, коэффициент прямоугольности по уровню -20дБ составляет 0,5.

На рис. 2 изображен внешний вид полосно-пропускающего фильтра, данный фильтр выполнен на диэлектрике Rogers с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=2.5$ , толщина слоя 0,76мм, толщина металла 35мкм. Габаритные размеры фильтра 45x24мм.

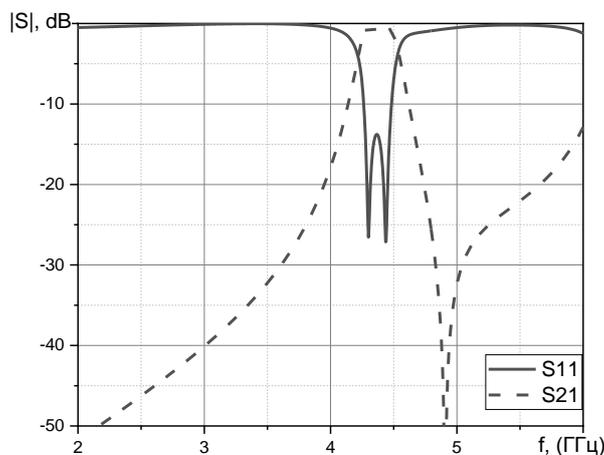


рис.1. Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты

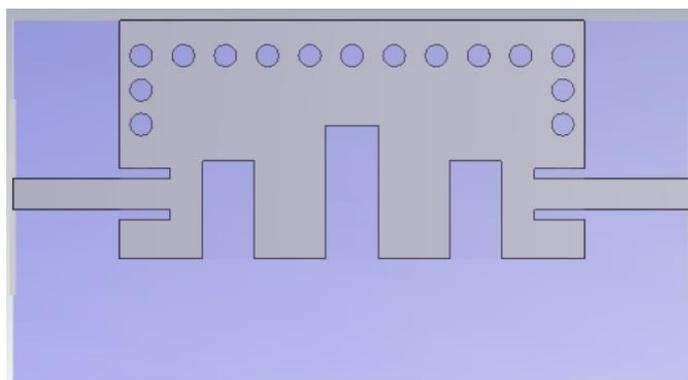


рис. 2. Внешний вид полосно-пропускающего фильтра

#### Список публикаций:

- [1] D. Dastanides and K. Wu, "Single-substrate integration technique for planar circuits and waveguide filters." *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 51, No. 2, pp. 593-596, Feb. 2003.
- [2] M. Bozzi, A. Georgiadis, and K. Wu, "Review of Substrate Integrated Waveguide (SIW) circuits and antennas," *JET Microwave Antennas Propag.*, Vol. 5, No. 8, pp. 909-920, June 2011.
- [3] X. Chen and K. Wu, "Substrate Integrated Waveguide Filter: Basic Design Rules and Fundamental Structure Features," *Microwave Mag.*, Vol. 15, No. 5, pp. 108-116, Jul/Aug. 2014.
- [4] N. Grigoropoulos, B.S. Izquierdo, and P-R. Young, "Substrate Integrated Folded Waveguides (SIFW) and Fillers," *JEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 15, No. 12, pp. 829-831, Dec. 2005.
- [5] W. Hong et al., "Half Mode Substrate Integrated Waveguide: A New Guided Wave Structure for Microwave and Millimeter Wave Application," *Proc. Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics*, p. 219, Shanghai, China, Sept. 18-22, 2006.
- [6]. Гадзиева, А.А., Заргано, Г.Ф., Земляков, В.В., Крутиев, С.В. SIW-технологии, история создания, современное состояние и перспективы развития // *Физические основы приборостроения*, 2012. Т. 1. № 4. С. 4-13.
- [7]. Гадзиева А.А., Земляков В.В., Крутиев С.В. Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр на волноводах сложного сечения, интегрированный в многослойную микросхему с применением SIW-технологии // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 1 (24).
- [8] Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Krutiev S.V., Tyaglov M.Y. *Electrodynamics Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide* // *Radiophysics and Quantum Electronics*, DOI 10.1007/s11141-019-09947-0, Том 61, Выпуск 12, Страницы 915 - 923, 15 June 2019

## Исследование зависимости размеров кластеров асфальтенов от концентрации асфальтенового раствора

*Некрасова Татьяна Вячеславовна*

*Шарипов Талгат Ишмухамедович*

*Башкирский государственный университет*

*Шарипов Талгат Ишмухамедович, к.ф.-м.н.*

*[drakon2000bel@gmail.com](mailto:drakon2000bel@gmail.com)*

Асфальтены – твердые высокоплавкие хрупкие вещества черного цвета. Их молекулярный вес колеблется в диапазоне 500-2000 г/моль. Содержание асфальтенов в нефтях колеблется от 1 до 20%. Молекулы асфальтенов легко растворяются в толуоле, бензоле, а также в сероуглероде.

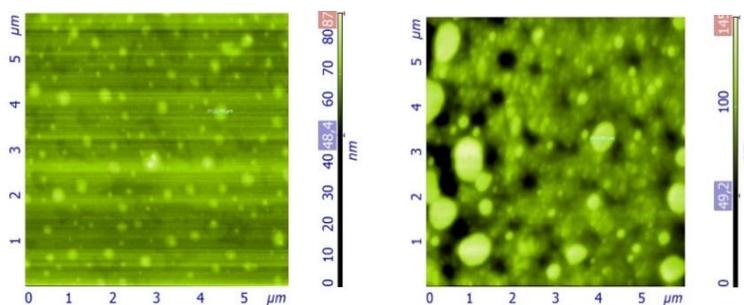
Самым распространенным методом исследования поверхности кластеров асфальтенов является сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ). Этот метод уникален тем, что он позволяет со сверхвысоким разрешением наблюдать надмолекулярную структуру различных объектов.

В ходе работы была исследована поверхность структуры асфальтенов с помощью атомно–силового микроскопа. Целью исследования является получение и сравнение кластеров асфальтенов в образцах, полученных при двух разных концентрациях.

Для эксперимента были взяты растворы асфальтенов исходного вакуумного остатка висбрекинга КИШ 42 (№ 3) с концентрациями 0,1 г/л и 0,5 г/л. Метод получения тонкой пленки асфальтенов на слюдяной подложке заключался в следующем: в дистиллированную воду опускали подложку, затем на поверхность воды наносили 15 мкл раствора асфальтенов в толуоле. После образования на поверхности воды пленки подложку медленно извлекали из жидкости через слой асфальтенов. Дальше ее помещали в чашку Петри и сушили 90 минут до полного высыхания. После чего полученный образец исследовали на атомно – силовом микроскопе.

На полученных АСМ–изображениях (Рис. 1) можно наблюдать различные объекты. На поверхности имеются скопления светлых пятен, называемые кластерами асфальтенов.

Измерив один из кластеров первого изображения, находим его высоту, равную 0,33 мкм, и ширину, равную 0,35 мкм. Точно также получаем размеры для кластера второго изображения, где высота равна 0,60 мкм, а ширина – 0,55 мкм.



*АСМ-изображение асфальтенов с концентрациями 0,1 г/л (слева) и 0,5 г/л (справа)*

Можно увидеть, что скопление объектов при концентрации 0,5 г/л значительно превосходит по количеству скопление объектов при 0,1 г/л.

На основании проделанного эксперимента можно сделать вывод, что размер кластера напрямую зависит от концентрации асфальтенового раствора. В частности, кластеры с концентрацией 0,1 г/л имеют меньшие размеры по сравнению с кластерами при концентрации 0,5 г/л.

Список публикаций:

[1] T.I. Sharipov, G.F. Gilyazova, R Z Bakhtizin. AFM visualization of asphaltenes surface structure. // Fifth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, Vladivostok, Russia, July 30 – August 03, 2020 : Proceedings. – Vladivostok: Dalnauka Publishing, 2020. – p.64.

## Волноводный частотный разветвитель на основе отбора отражённой волны

*Нестеров Вадим Юрьевич*  
*Царегородцев Олег Владимирович*  
*Южный федеральный университет*  
*Крутиев Сергей Владимирович*  
[vadnesterov@sfedu.ru](mailto:vadnesterov@sfedu.ru)

Ввиду необходимости непрерывного обмена информацией между космическими аппаратами, находящимися на орбитах различного типа, и объектами на поверхности Земли, удалёнными на большие расстояния друг от друга, использование приёмо-передающих спутниковых систем связи приобретает массовый характер. Особенной популярностью пользуются малоапертурные антенны (1,2 – 2,4 м), что налагает ограничения на массогабаритные характеристики облучающей системы. В связи с постоянно растущим числом абонентов информационная загруженность всех используемых диапазонов стремительно повышается, причём наименее свободным является С-диапазон. По этой причине необходимо задействовать всю выделенную полосу частот для каналов приема и передачи с относительными рабочими полосами частот 21% и 16% соответственно. Также для работы с отечественными и иностранными станциями связи необходима возможность работы с сигналами круговых и линейных ортогональных поляризаций, что подразумевает высокий уровень кросс-поляризационной развязки.

Для обеспечения этих целей используются приёмо-передающие антенно-волноводные устройства (АВУ), содержащие облучатель и устройства поляризационной и частотной селекции, возможные схемы построения представлены в [1]. Существующие АВУ не сочетают в себе одновременно широкополосность, компактность и удовлетворительные электрические параметры. Снижение массы и габаритов облучающей системы достигается минимизацией входящих в неё частей. Наиболее громоздкими в приёмопередающих АВУ являются элементы, обеспечивающие частотное разделение каналов.

В данной работе был синтезирован волноводный разветвитель на основе отбора отражённой волны, что является противоположностью наиболее распространённой схеме последовательного отбора частотных диапазонов в порядке увеличения частоты. Ключевыми элементами этого устройства являются двухполяризационный осесимметричный фильтр нижних частот на основе четырёхгребневого волновода, и устройство отбора отражённых от фильтра волн. 3D модель рассчитанного устройства представлена на рис. 1.

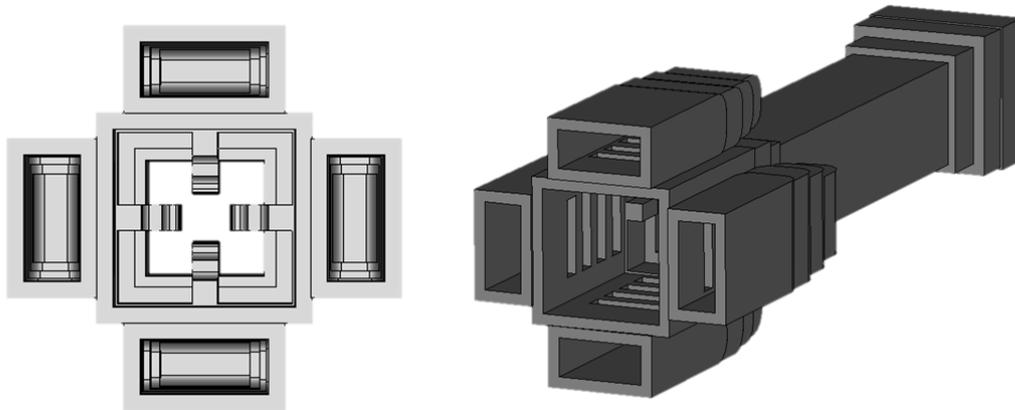


рис.1. 3D модель волноводного разветвителя

В ходе работы был проведён анализ существующих схем построения АВУ и используемых в них методов частотной селекции, определены технические решения для построения разветвителя, синтезированы и смоделированы устройство отбора и фильтр, входящие в разветвитель. Фильтр представляет собой четырёхгребневой волновод с участками регулярного сечения. Методика расчёта фильтра представлена в [2]. Произведена композиция в единую модель, проведена многопараметрическая оптимизация, и просчитаны электрические характеристики. Для обоих диапазонов значение потерь на отражение не превышает 0.05 дБ, коэффициент отражения менее -20 дБ, частотная развязка более 34 дБ в диапазоне приёма и более 47 дБ в диапазоне передачи, полученные данные представлены на рис. 2.

Улучшение массогабаритных характеристик можно продемонстрировать, рассчитав при прочих равных условиях изменение массы и размеров благодаря использованию волноводных плеч и сумматора, которые обеспечивают распространение волн передающего вместо приёмного диапазона. Тогда масса устройства разветвления снижается на 37%, а поперечный габарит снижается на 41%.

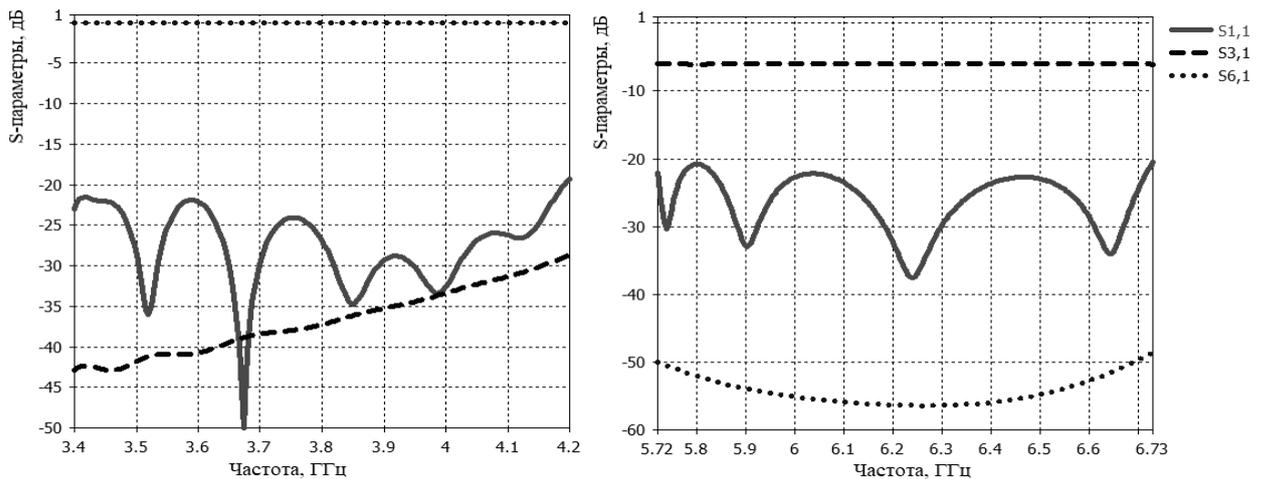


рис.2. S-параметры волноводного разветвителя

Результаты работы позволяют сделать вывод о том, что полученный разветвитель в волноводном исполнении может быть использован в качестве ключевого элемента антенно-волноводного тракта с уменьшенными массогабаритными параметрами и обеспечивающего качественную работу с сигналами ортогональных круговых и линейных поляризацій.

Список публикаций:

- [1] Cecchini P., Mizzoni R. Wideband diplexed feed chains for FSS+BSS applications.// *IEEE*, 2005. – P. 3095-3099.  
 [2] Земляков В.В. Проектирование широкополосных полосно-пропускающих фильтров на гребневых волноводах. // *Электромагнитные волны и электронные системы. Вып 6, 2012 г. 71-75 с.*

## Радиоизлучение пьезокерамики ЦТСЛ

*Панова Анастасия Владимировна*

*Сабурова Валерия Сергеевна*

*Южный федеральный университет*

*Сидоренко Евгений Никифорович, к.ф.-м.н.*

*[nastya.shaprinskaya@mail.ru](mailto:nastya.shaprinskaya@mail.ru)*

Изучены экспериментально радиоизлучающие свойства прозрачной пьезокерамики цирконата — титаната свинца — лантана (ЦТСЛ-керамики) состава 8/65/35. Известно, что ЦТСЛ-керамика в температурном интервале от 20 до 150 °С имеет размытый частотно зависимый фазовый переход, и для нее характерны различные аномальные свойства. Так в переменном низкочастотном электрическом поле в ней формируется двойная петля гистерезиса. В керамике наблюдается температурный гистерезис диэлектрической проницаемости. ЦТСЛ-керамика имеет дисперсию диэлектрической проницаемости. Сильная частотная зависимость свойств этой керамики указывает на важную роль релаксационных процессов, которые имеют аномально широкий спектр времен релаксации [1].

В данной работе в области частот (3,1 - 5,6) ГГц исследована излучающая способность резонатора из ЦТСЛ-керамики, размещенного на поверхности микрополосковой линии. Известно, что микрополосковая линия с диэлектрическим резонатором образуют диэлектрическую резонаторную антенну. Так как электромагнитная волна, распространяющаяся в диэлектрике, имеет длину волны в  $\sqrt{\epsilon}$  раз меньшую, чем в свободном пространстве, то размеры диэлектрических антенн во столько же раз меньше антенн, изготовленных из металлических проводников. Поэтому, в настоящее время простые компактные диэлектрические резонаторные антенны с диэлектриками различной формы и с разными значениями диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  широко применяются в мобильной радиоаппаратуре связи [2].

При снятии спектров интегрального излучения электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля в качестве индикаторов поля использованы штыревая и петлевая антенны. Исследуемый керамический образец без электродов толщиной 0,4 мм располагался на центральном проводнике микрополосковой линии. Постоянная составляющая детектированного СВЧ диодом сигнала U

измерялась цифровым вольтметром. Измеренные значения  $\sqrt{U}$  рассматривались как величины, пропорциональные напряженности электрического ( $E^*$ ) или индукции магнитного ( $B^*$ ) поля [3].

На рисунке 1 представлены спектры интегрального излучения напряженности электрического ( $E^*$ ) и индукции магнитного ( $B^*$ ) поля, полученные при комнатной температуре на различных высотах от поверхности исследуемого образца. Вид этих спектров характеризует исследуемую систему как диэлектрическую частотно-избирательную антенну.

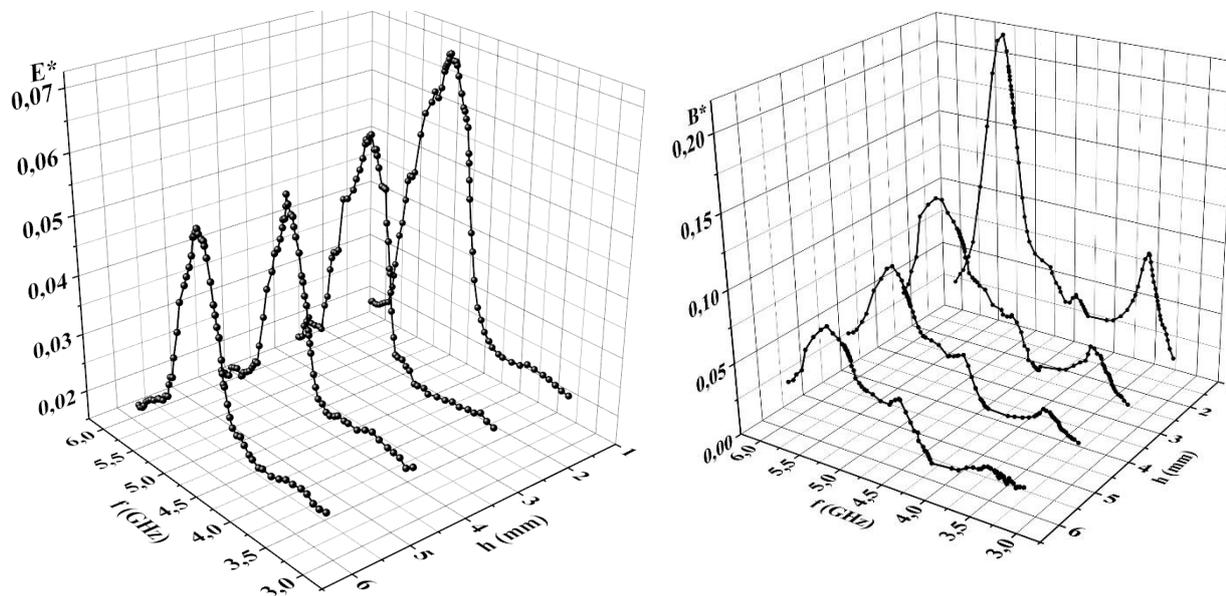


рис.1. Спектры интегрального излучения напряженности электрического ( $E^*$ ) и индукции магнитного ( $B^*$ ) поля на различной высоте от поверхности пьезокерамического ЦТСЛ образца

В спектрах независимо от высоты в области частот (5,1-5,3) ГГц наблюдаются максимумы излучения энергии, величины которых уменьшается при удалении от поверхности образца. Максимальная высота, на которой еще фиксировалось поле с помощью петлевой антенны равна 10 см.

Используем приближенную формулу расчета резонансной частоты для волны типа  $TE_{016}$  цилиндрической диэлектрической резонаторной антенны:

$$f_0 = \frac{34}{r\sqrt{\epsilon}} \left( 3,45 + \frac{r}{h} \right).$$

Из эксперимента и полученных зависимостей  $E^*(f)$  и  $B^*(f)$  имеем:  $f_0=5,2$  ГГц,  $r=4$  мм,  $h=0,4$  мм. Тогда рассчитанная на этой частоте величина диэлектрической проницаемости пьезоэлектрического ЦТСЛ резонатора равна 485.

Таким образом, экспериментально полученные спектры излучения позволяют оценить величину СВЧ диэлектрической проницаемости релаксора ЦТСЛ. Метроволновая дисперсия релаксационного типа и СВЧ диэлектрическая дисперсия резонансного типа, в результате чего в сегнетоэлектриках наблюдаются большие диэлектрические потери, уменьшают более чем в 10 раз диэлектрическую проницаемость керамики ЦТСЛ [4].

Список публикаций:

- [1] Смоленский Г.А. Крайник Н.Н. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики – Л.: Наука, 1971. – 476 с.
- [2] Слюсар В.И. Диэлектрические резонаторные антенны // Электроника: НТБ, 2007, № 2. С. 28-37
- [3] Sidorenko E.N., Privalov E.E., Demchenko A.A., Kabirov Yu.M., Chebanova E.M., Nathan I.I. // *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. 2019. P. 464-467
- [4] Sidorenko E.N., Chan Thi Beat Ngoc, Prikhodko G.I., Natkhin I.I., Shloma A.V., Kharchenko D.G. // *Journal of Advanced Dielectrics Vol. 10, No. 01n02, 2060020* (2020)

## Электродинамический анализ и синтез метаволноводного полосно-пропускающего фильтра

*Сдобнова Варвара Павловна*  
*Крутиев Сергей Владимирович*  
Южный федеральный университет  
*Крутиев Сергей Владимирович*  
[sdobnova@sfedu.ru](mailto:sdobnova@sfedu.ru)

Волноводные фильтры являются идеальным решением для космических приложений благодаря низким потерям энергии и возможности обработки большой мощности без ограничения частоты. Основным недостатком волноводных фильтров является их большой объем и большой вес из-за размеров образующих их волноводных полостей, которые напрямую зависят от рабочей длины волны. Для уменьшения размеров стали использовать коаксиальные комбинированные фильтры и фильтры на волноводе соответственно с коаксиальным и волноводным интерфейсами. Комбинированные фильтры имеют уменьшенные размеры, поскольку в них используются параллельно соединенные коаксиальные полости, где каскадные коаксиальные полости реализуют цепочку ТЕМ-мод, соединенных с само- и взаимемкостями. Цель исследования - продемонстрировать возможность разработки и производства сверхмалых волноводных метаматериальных фильтров (метафильтров), малые размеры которых в значительной степени не зависят от рабочей частоты, используя сильные нелокальные взаимодействия, возможные в метаматериалах.

В исследовании привлечен электродинамический анализ группы штырей.

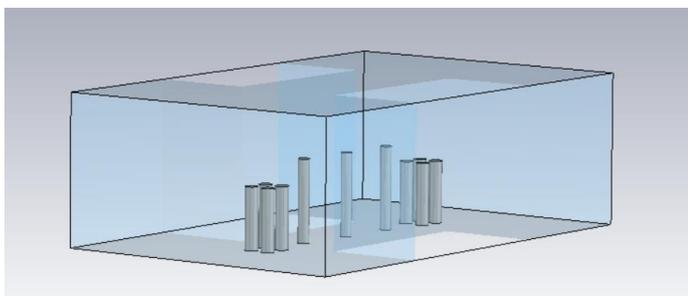


рис.1. Вид фильтра с группой штырей

На основании электродинамического анализа свойств одиночного штыря и группы штырей, был синтезирован полосно-пропускающий фильтр на волноводе. На рис.2 представлены амплитудно-частотные характеристики синтезированного фильтра:

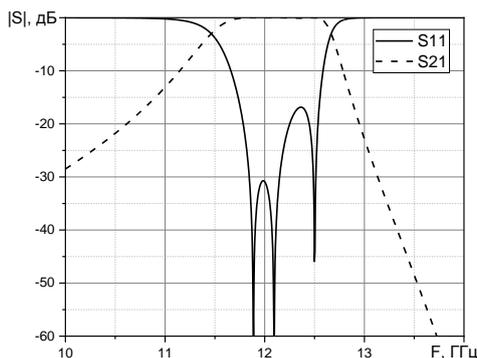


рис.2. S-параметры для фильтра с тремя штырями

Список публикаций:

- [1] Subwavelength Metawaveguide Filters and Metaports Maliheh Khatibi Moghaddam and Romain Fleury
- [2] V. E. Boria and B. Gimeno, Waveguide filters for satellites
- [3] G. L. Matthaei, B. Schiffman, E. Cristal, and L. Robinson, Microwave Filters and Coupling Structures (1963).
- [4] Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Krutiev S.V., Tyaglov M.Y. Electrodynamic Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide // Radiophysics and Quantum Electronics, DOI 10.1007/s11141-019-09947-0, Том 61, Выпуск 12, Страницы 915 - 923, 15 June 2019
- [5] Krutiev S.V., Zemlyakov V.V., Lonkina D.V. Synthesis Of Band-Pass Filters On Rectangular H-Plane Cavities // Moscow Workshop On Electronic And Networking Technologies, Mwent 2020 -Proceedings 2020, Doi: 10.1109/Mwent47943.2020.9067425

## **18 - Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях**

Двойнишников Сергей Владимирович, зав. лаб.

Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

**Методы оптико-электронной диагностики геометрических параметров для промышленных технологий**

e-mail: [dv.s@mail.ru](mailto:dv.s@mail.ru)

стр. 160

Зуев Владислав Олегович, 1 курс

Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический

**Программно-аппаратный комплекс для измерения трехмерной геометрии наледи триангуляционными методами с использованием структурированного освещения**

Двойнишников Сергей Владимирович, д.т.н.

e-mail: [vlad.zuev.0017@mail.ru](mailto:vlad.zuev.0017@mail.ru)

стр. 161

## Оптико-электронная диагностика геометрических параметров для промышленных технологий

*Двойнишников Сергей Владимирович*  
*Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН*  
*[dv.s@mail.ru](mailto:dv.s@mail.ru)*

Задача высокоточных измерений геометрических параметров в технологических процессах является важной для широкого спектра промышленных применений. Контроль геометрии сложнопрофильных изделий важен для нефтегазового и аэрокосмического комплексов, энергетики и атомной промышленности, всюду, где необходим размерный контроль точных машиностроительных изделий со сложной геометрией [1-4].

Существующие решения, направленные на измерение геометрических параметров оптическими методами можно разбить на несколько больших групп: интерференционные, времяпролетные, фазовые, триангуляционные, методы частотной модуляции и методы анализа визуальных образов. В представляемом докладе внимание уделено различным научно-техническим решениям, которые находят применение в задачах измерения геометрических параметров в различных технологических процессах в промышленности и науке.

Методы оптической триангуляции основаны на определении расстояния по положению пятна рассеянного на поверхности пучка излучения на фотоприемнике. Метод оптической триангуляции работает следующим образом. Излучательный канал формирует изображение светового пятна на контролируемой поверхности. Рассеянный контролируемой поверхностью свет попадает в приемный канал. В плоскости фотоприемника строится изображение освещенного участка контролируемой поверхности в форме светового пятна. При смещении контролируемой поверхности на величину  $\Delta Z$  (рис. 1), световое пятно в плоскости фотоприемника смещается на величину  $\delta z$ . Зависимость смещения контролируемой поверхности  $\Delta Z$  от смещения светового пятна в плоскости фотоприемника  $\delta z$  имеет следующий вид:

$$\Delta Z = r \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\alpha - \varphi)}, \quad (1)$$

$$\varphi = \text{atan}\left(A \cdot \frac{\delta z}{1 + B \cdot \delta z}\right) \quad (2)$$

$$A = \sin \beta / r' \quad (3)$$

$$B = -\cos \beta / r' \quad (4)$$

где  $r$  и  $r'$  - расстояния от контролируемой поверхности до проецирующего объектива приемного канала и от проецирующего объектива до фотоприемника. Существует большое количество модификаций метода оптической триангуляции, нацеленных на улучшение метрологических характеристик в специфических условиях.

Триангуляционные методы светового сечения заключаются в формировании на поверхности объекта узкой световой полосы и наблюдении ее формы с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемые искажения полосы определяют геометрию поверхности в плоскости светового сечения.

Известны методы бесконтактного измерения полного трехмерного профиля поверхности, реализующие принцип сканирующей подсветки, который используется в трехмерной компьютерной анимации и некоторых других приложениях для регистрации формы поверхности. Метод основан на том, что последовательно сканируют отдельные контуры поверхности светящейся полосой и судят о контролируемых размерах по степени искажения изображения полосы и ее местоположению в декартовой системе координат. Основным недостатком данного метода заключается в высокой погрешности и длительном времени контроля, связанном с наличием операции последовательного сканирования.

Наиболее часто используемой модификацией метода триангуляции является триангуляция с использованием пространственной модуляции оптического источника. Данный метод предполагает, что на поверхность контролируемого объекта проецируют не световой пучок, а пространственно модулированную засветку (одномерную или двухмерную). На фотоприемнике анализируют наблюдаемое двухмерное распределение рассеянного излучения, которое, в случае формирования засветки в виде полутоновых полос с гармоническим изменением интенсивности, может быть описано следующим выражением:

$$I(x, y) = A(x, y)(1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y))) \quad (5)$$

где  $I(x, y)$  – распределение интенсивности на изображении контролируемого объекта;  $A(x, y)$  – распределение фоновой интенсивности;  $V(x, y)$  – средняя видность;  $\varphi(x, y)$  – распределение разности фаз, кодирующее информацию о дальности объекта;

В докладе представлены различные современные методы оптико-электронной диагностики, позволяющие выполнять измерения геометрических параметров, а также выполнять трехмерное сканирование поверхности измеряемого объекта в промышленных условиях. Будут рассмотрены методы, адаптированные для работы в тяжелых эксплуатационных условиях действующей промышленности.

Список публикаций:

[1] Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G. *Optoelectronic Differential Cloudy Triangulation Method for Measuring Geometry of Hot Moving Objects / Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*, M.Rivas-Lopez, O.Sergiyenko, W.Flores-Fuentes, J. C. Rodríguez-Quíñonez, August 2018, p. 49-78.

[2] Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. (2020) *Advanced Phase Triangulation Methods for 3D Shape Measurements in Scientific and Industrial Applications*. In: Sergiyenko O., Flores-Fuentes W., Mercorelli P. (eds) *Machine Vision and Navigation*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2\_21.

[3] D V Kulikov, A S Chubov, O Yu Sadbakov, S V Krotov, N N Ovchinnikov *Method of measuring the geometry of rotating parts of power stations based on the effect of self-mixing of laser radiation // 2019 Journal of Physics: Conference Series Vol. 1359, 012098.*

[4] S.V. Dvoynishnikov, V.V. Rakhmanov, I.K. Kabardin, V.G. Meledin *Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // Measurement, Vol.145 (2019). - P. 63–70.*

## **Программно-аппаратный комплекс для измерения трехмерной геометрии наледи триангуляционными методами с использованием структурированного освещения Зуев Владислав Олегович**

*Новосибирский государственный университет*

*Двойнишиников Сергей Владимирович, д.т.н.*

*[vlad.zuev.0017@mail.ru](mailto:vlad.zuev.0017@mail.ru)*

Среди задач измерения трехмерной геометрии объекта особое место занимает задача измерения трехмерной геометрии наледи. Актуальность данной задачи обусловлена наличием широкого спектра научно-технических задач, направленных на борьбу с обледенением. Примером может служить задача поиска оптимального метода борьбы с обледенением на ветрогенераторах, при решении которой появляется необходимость системы диагностики и анализа трехмерной геометрии наледи. Требования высокой точности измерения, учета отражающих свойств наледи, отсутствия контакта с измерительным объектом существенно ограничивают выбор метода измерения. Среди оптических методов измерения трехмерной геометрии наиболее перспективны триангуляционные с использованием структурированного освещения ввиду их высокой точности, широкого применения и существенного уровня развития.

Целью данной работы является разработка программно-аппаратного комплекса для измерения и анализа трехмерной геометрии наледи триангуляционными методами с использованием структурированного освещения. В рамках работы требуется разработать систему измерения трехмерной геометрии слоя льда, образующегося на объекте. Измерения выполняются в трубе прямоугольного сечения с характерными размерами 20x20 см с прозрачными стенками.

Метод измерения трехмерной геометрии реализован на основе комбинации триангуляционных методов с использованием структурированного освещения: фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Использование комбинации методов взаимноисключает их недостатки. Совокупность однозначности декодирования бинарных кодов Грея и непрерывности фазы повышает точность измерения. Работа данных методов реализована с помощью проектора и камеры, благодаря чему появилась возможность гибкой настройки конфигурации измерительной установки.

Для подбора оптимальных параметров измерительной оптической системы реализовано программное обеспечение для анализа работы методов фазовой регрессии, бинарных кодов Грея, комбинации методов и всей измерительной системы в целом. Дополнительно реализованное программное обеспечение выполняет оценку погрешности измерений. Данная функциональность применена для настройки оптимальных параметров измерительного комплекса. Для расчета и анализа геометрических параметров наледи разработано программное обеспечение на языке программирования Python в среде Jupyter. Программное обеспечение предоставляет следующую функциональность: расчет толщины ледяного нароста в каждой точке объекта, расчет статистических данных по толщине наледи, анализ наледи внутри среза по поверхности объекта. Полученные с помощью программного комплекса данные можно использовать для численной оценки массы ледяного нароста.

Создан измерительный комплекс для измерения трехмерной геометрии наледи на экспериментальном стенде для исследования процессов обледенения элементов ветроэнергетических установок. Измерительный комплекс состоял из фотоприемника Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, цифрового проектора Excelvan CL720 с разрешением 1280x800 и светосилой 3000 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60-80 см. Измерительный объем составил 85 мм x 67 мм x 25 мм. Расстояние от источника освещения до измеряемого объекта 65 см, расстояния от фотоприемника до объекта 150 см. Угол между оптическими осями источника и приемника оптического излучения 70°. Достигнута погрешность измерений на уровне 9 мкм.

В результате создан программно-аппаратный комплекс для измерения трехмерной геометрии наледи, реализующий методы фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Разработаны конфигурации измерительной системы для диагностики наледи на различных участках объекта. Достигнута точность измерений 9 мкм. Проведены эксперименты по измерению трехмерной геометрии наледи характерной толщиной 0.75 мм и диагностике ее геометрических параметров. Получены результаты, демонстрирующие широкий спектр применимости триангуляционных методов с использованием структурированного освещения.

## 19 - Теплофизика и теплотехника. Процессы тепломассобмена

Грибакова Татьяна Владимировна, инженер-исследователь  
Екатеринбург, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
**Достижимый перегрев раствора пропан-водород**  
Каверин Алексей Михайлович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [tatyana.gribakova@yandex.ru](mailto:tatyana.gribakova@yandex.ru) стр. 164

Ковальчук Татьяна Николаевна, 4 курс  
Тюмень, Тюменский государственный университет, Физико-технический институт  
**Физико-математическая модель пароциклической обработки с параллельным наклонным смещением фронта прогрева**  
Шевелев Александр Павлович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [t.n.kovalchuk@mail.ru](mailto:t.n.kovalchuk@mail.ru) стр. 165

Хатламаджиян Юрий Борисович, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Исследование неоднородности поля градиента температуры в жидких включениях, мигрирующих в кристалле**  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [xatlamajivan@yandex.ru](mailto:xatlamajivan@yandex.ru) стр. 166

## Достижимый перегрев раствора пропан-водород

*Грибакова Татьяна Владимировна*  
*Институт теплофизики УрО РАН*  
*Каверин Алексей Михайлович, к.ф.-м.н.*  
*[tatyanagribakova@yandex.ru](mailto:tatyanagribakova@yandex.ru)*

Методом измерения времени жизни [1] исследована кинетика спонтанного вскипания перегретого раствора пропан-водород. Жидкость перегревалась в стеклянном капилляре объёмом  $V = 120 \text{ мм}^3$ . При заданных давлении и температуре проводилось  $N = 20-50$  измерений времени жизни раствора  $\tau_i$ , определялось среднее время жизни  $\bar{\tau} = \sum_i^N \tau_i / N$  и частота зародышеобразования  $J = (V \cdot \bar{\tau})^{-1}$ . Опыты проведены по изобарам 1.3, 1.6 и 1.9 МПа при концентрации водорода в растворе  $x = 0.08$  мол %. Исследованный интервал средних времён ожидания вскипания составил 0.06 – 60 с, что соответствует интервалу частот зародышеобразования  $J = 1.4 \cdot 10^5 - 1.4 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Температурная зависимость  $\bar{\tau}$  представлена на рис. 1.

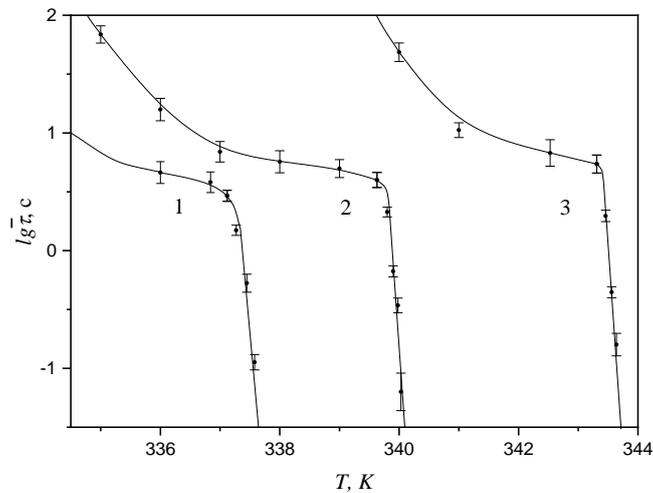


рис.1. Температурная зависимость среднего времени жизни перегретого раствора пропан-водород по изобарам 1.0 (1), 1.6 (2) и 2.0 МПа (3)

При  $lg \bar{\tau} \lesssim 0.5$  наблюдается сильная зависимость среднего времени жизни жидкости от температуры, что объясняется реализацией на данных участках изобар гомогенного механизма зародышеобразования. При более низких температурах вскипание обусловлено иницирующим действием фонового и космического излучения, контактом перегретой жидкости с внутренней поверхностью капилляра и другими факторами.

Значения температуры достижимого перегрева раствора  $T_n$ , соответствующие  $J = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , для исследованных изобар составляют, соответственно, 337.4, 339.9 и 343.5 К. Сопоставление полученных значений  $T_n$  с аналогичными данными для чистого пропана [2] показывает, что растворение 0.08 мол % водорода приводит к понижению температуры достижимого перегрева на 0.7 – 0.9 К.

Список публикаций:

- [1] Байдаков В.Г. // *Перегрев криогенных жидкостей*. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 264 с.  
[2] Байдаков В. Г., Каверин А. М., Скрипов В. П. // *Журн. физ. химии*, 1986. Т. 60. № 2. с. 444.

## Физико-математическая модель пароциклической обработки с параллельным наклонным смещением фронта прогрева

*Ковальчук Татьяна Николаевна*

*Гильманов Александр Янович*

*Тюменский государственный университет*

*Шевелев Александр Павлович*

*[t.n.kovalchuk@mail.ru](mailto:t.n.kovalchuk@mail.ru)*

На данный момент из-за падения темпов добычи углеводородов возникает потребность в совершенствовании методов нефтедобычи. В последнее десятилетие разработка пластов трудноизвлекаемой нефти имела значительный успех, однако проблемы остаются, поскольку скорость потока быстро снижается, при этом коэффициенты извлечения нефти низки. Применение термических методов воздействия на пласты высоковязких нефтей позволяет повысить эффективность разработки.

Построение моделей пластовых процессов в случае пароциклического воздействия на нефтяные пласты – это актуальная задача. Для решения комплекса практических задач имеется необходимость в наличии моделей циклического теплового воздействия на нефтяные пласты. Главным образом на выбор оптимального режима нефтедобычи влияют следующие параметры: протяженность прогреваемой области в пространстве, дебит нефти, интервал времени за который происходит закачка теплоносителя в пласт, а также время паротеплового воздействия. Для определения искомых параметров в настоящее время используются гидродинамические симуляторы или вводятся допущения, которые в значительной степени упрощают моделирование движения теплового фронта и при этом приводят к существенным погрешностям.

Снижение значения вязкости нефти при увеличении температуры оказывает значительное влияние на дебит и коэффициент извлечения нефти. В случае маломощных пластов высоковязкой нефти имеется необходимость в применении именно технологии пароциклического воздействия, поскольку не имеется возможности для бурения нагнетательной скважины.

Распределение пара в пласте является неравномерным и зависит от глубины. Физико-математическая модель пароциклической обработки с параллельным наклонным смещением фронта прогрева основана на определенных предположениях. Имеется отчетливая граница между прогретой и «холодной» нефтью. Граница – прямая линия. В декартовой системе координат при начальных условиях она определяется максимальными мощностью  $h$  и радиусом прогрева. Впоследствии граница раздела перемещается параллельно своему начальному положению, область прогретой нефти уменьшается. Равенство тепловых потерь  $W$  с закачиваемой теплотой  $H$  приводит к выражению:

$$\frac{dW}{dt} = \int_{r_w}^{r_f} \pi r \alpha (T(r) - T_0) dr = \frac{dH}{dt} = Q_3 \rho_s (c_s (T_s - T_0) + l) \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $T_s$  и  $T_0$  – температуры пара и пласта,  $Q_3$  – дебит закачки пара,  $\rho_s$  и  $c_s$  – плотность и теплоёмкость пара,  $l$  – удельная теплота парообразования,  $r_w$  – радиус скважины. Выражение (1) позволяет определить радиус фронта прогрева  $r_f$ .

Текущая координата фронта пара  $r_*$  определяется из объёмной скорости движения теплового фронта:

$$D_f = \frac{\pi h r_f^2 - \pi x r_*^2}{3t} = \frac{Q_3 K_T}{m} \quad (2)$$

где  $x$  – текущая координата вдоль вертикальной оси из-за параллельного смещения,  $t$  – текущий момент времени,  $m$  – пористость,  $K_T$  – отношение теплосодержания нефти  $R_0$  к теплосодержанию породы  $R_r$ . Тогда

$$r_*(t) = \sqrt[3]{\left( \pi h r_f^2 - \frac{3t Q R_0}{m R_r} \right) \frac{r_f}{\pi h}} \quad (3)$$

Описание прогретой области посредством предлагаемой конусообразной модели является более точным в сравнении с простейшей цилиндрической моделью.

Теплофизические процессы, учитываемые в пределах представленной выше модели, описываются с помощью законов сохранения. Численные методы позволяют промоделировать вышеуказанный теплофизический процесс при составлении системы состоящей из законов сохранения. Определение протяженности зоны прогретой нефти происходит с учетом расхода и теплосодержания теплоносителя, мощности пласта и тепловых свойств породы. Вывод итогового равенства для дебита осуществляется из

уравнения Дарси. Дебит жидкости в скважину с учетом зонального изменения температуры и вязкости нефти в рамках данной модели будет определяться выражением:

$$Q = \frac{\pi k(p_c - p_w) \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_c}\right)^2}}{\mu \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_*}\right) + \mu_T \left(\frac{1}{r_*} - \frac{1}{r_w}\right)} \quad (4)$$

где  $\mu_T$ ,  $\mu$  – вязкость нефти при температуре пара  $T_s$  и при пластовой температуре,  $p_c$  – давление на контуре питания,  $p_w$  – давление на забое скважины,  $k$  – проницаемость. Это выражение учитывает, что нагретая нефть находится в конусообразной зоне от скважины до координаты  $r_*$ , непрогретая – в остальной области фильтрации до радиуса контура питания  $r_c$ .

Предложена физико-математическая модель пароциклической обработки с параллельным наклонным смещением фронта прогрева с учетом размеров прогретой зоны. Предложенная методика предоставляет возможность более точным образом предсказать технологические параметры разработки месторождения. Это позволит выбрать более рациональный режим разработки пласта и, следовательно, увеличить коэффициент извлечения нефти.

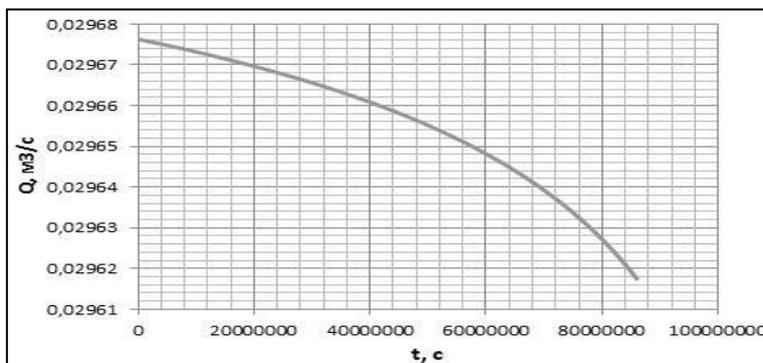


рис.1. Зависимость дебита от времени для разработанной модели

Зависимость дебита от времени при определенных модельных параметрах будет иметь вид (рис.1), в случае если для моделирования взяты следующие параметры;  $\mu = 0,01 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\mu_T = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $r_c = 900 \text{ м}$ ,  $r_w = 0,1 \text{ м}$ ,  $Q_z = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\rho_s = 40 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $c_s = 4400 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $l = 2300000 \text{ Дж}/\text{кг}$ ,  $T_0 = 350 \text{ К}$ ,  $T_s = 450 \text{ К}$ ,  $\alpha = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ,  $m = 0,3$ ,  $h = 20 \text{ м}$ ,  $p_c = 200 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $p_w = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $\rho_r = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\rho_o = 800 \text{ кг}/\text{м}^3$  – плотности породы и нефти;  $c_r = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $c_o = 4500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  – теплоемкость породы и нефти.

## Исследование неоднородности поля градиента температуры в жидких включениях, мигрирующих в кристалле

*Хатламаджиян Юрий Борисович*  
Южный федеральный университет  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
[yhat@sfedu.ru](mailto:yhat@sfedu.ru)

Термомиграция — это явление, которое заключается в движении жидких включений в объеме кристалла под действием градиента температуры [1-4]. Причина возникновения такого движения – различие в условиях равновесия фаз вдоль межфазной границы, вызванное неоднородным нагревом кристалла. Анализ миграции включений в кристалле под действием градиента температуры и, в частности, их формы, установившейся во время движения, важен для исследования процессов кристаллизации, растворения, массопереноса в жидкой фазе [2-4].

Для успешного решения и прикладных, и исследовательских задач с помощью процесса термомиграции необходимо иметь его адекватную математическую модель. К настоящему времени разработано большое количество моделей, использующих разнообразные упрощающие предположения [2-4]. В большинстве случаев для упрощения модели предполагается, что градиент температуры однороден в области жидкой фазы. Это действительно так при условии, если теплопроводности жидкой и твердой фазы одинаковы, а кристалл

непрозрачен для внешнего и собственного излучения. Однако в общем случае эти условия не выполняются, и поэтому важно знать степень влияния различия теплопроводностей жидкой и твердой фазы на неоднородность поля градиента температуры в жидком включении, и, в конечном итоге, на его форму.

Аналитически данная задача не может быть решена и требует применения численных методов. Для получения оценочных результатов на начальном этапе изучения рассматриваемой проблемы имело смысл использовать готовые математические пакеты. В настоящей работе для моделирования теплопереноса в неоднородной среде был использован математический пакет FlexPDE, с помощью которого решалось двумерное стационарное уравнение теплопроводности:

$$\text{div}(k \text{ grad}T) = 0, \quad (1)$$

где  $k=k(x, y)$  – коэффициент теплопроводности, зависящий от координат  $x, y$ ;  $T=T(x, y)$  – температура в неоднородной двумерной прямоугольной области.

При моделировании были рассмотрены два вида форм поперечных сечений включений: прямоугольное, характерное, например, для термомиграции включений водного раствора KBr в кристалле KBr в направлении  $\langle 100 \rangle$  (рис.1а), и многоугольное, близкое по форме к включениям, мигрирующим в направлении  $\langle 111 \rangle$  кристалла Si (например, состава Si-Al, рис. 1б).

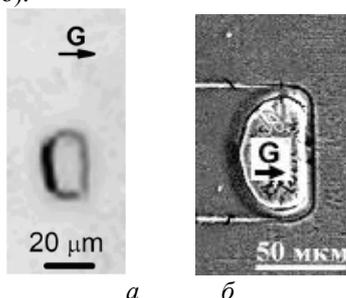


рис.1. Экспериментально полученные [4] формы сечений включений состава KBr-H<sub>2</sub>O в кристалле KBr (а) и состава Si-Al в кристалле Si, мигрирующие под действием градиента температуры G

Для оценки степени неоднородности поля градиента температуры имело смысл рассматривать два распределения температуры: вдоль средней линии сечения включения и на его боковой границе. Очевидно, что при однородном градиенте температуры эти два графика должны совпадать. Нас же интересовала степень их несовпадения при разном соотношении теплопроводностей жидкой и твердой фазы.

Из результатов моделирования в случае прямоугольной формы сечения с соотношением сторон 2:1 максимальное отклонение распределений температуры в центре и по краю включения отличаются от общего перепада температуры на толщине включения на 6% и 12% (рис.2а) при условии, что теплопроводности жидкой и твердой фазы отличаются в 2 и 5 раз. В случае многоугольного включения аналогичные отклонения при тех же соотношениях теплопроводностей составляли, соответственно, 21% и 36%(рис.2б).

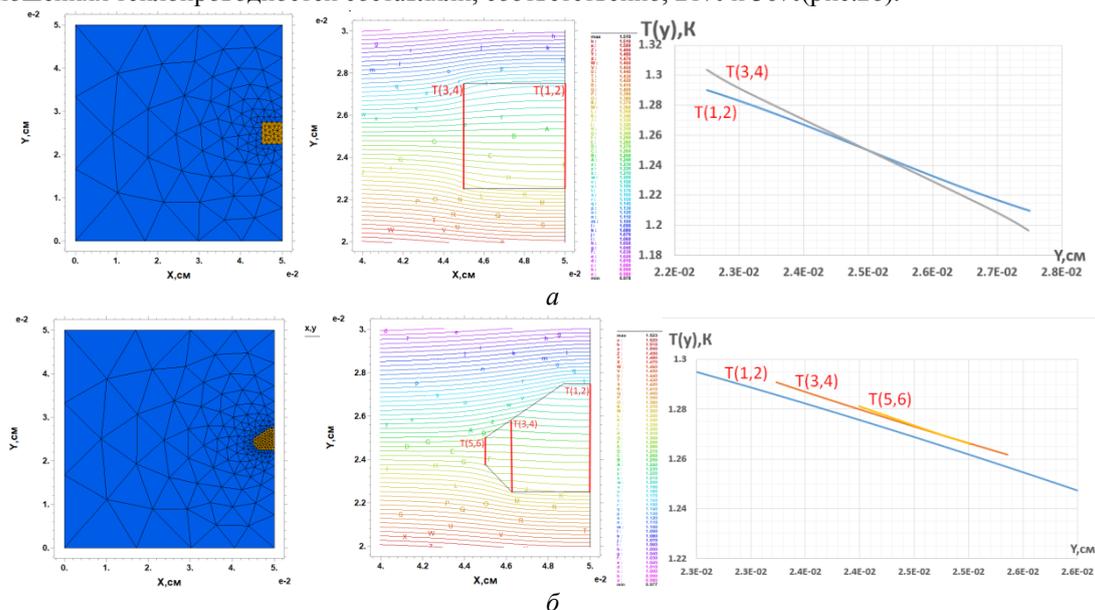


рис.2. Результаты моделирования распределения температуры в области включения с прямоугольной (а) и многоугольной (б) формой сечения

Полученные оценочные данные достаточно велики и тем самым указывают на необходимость учета соотношения теплопроводностей твердой и жидкой фаз при моделировании форм сечений включений.

Список публикаций:

- [1] Леммлейн Г. Г. Перемещение жидкого включения в кристалле в направлении к источнику тепла [Текст] // Докл. АН СССР. 1952. Т. 85. № 2. С. 325–328.
- [2] Лозовский, В.Н., Лукин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов [Текст] // М.: Металлургия. 1987. 232 с.
- [3] Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А. Движение макроскопических включений в твердых телах [Текст] // М.: Металлургия. 1971. 344 с.
- [4] Garmashov S.I. A model of shapes of liquid cylindrical inclusions migrating through a non-uniformly heated crystal: Fundamentals and applications for studying crystallization and dissolution // J. Cryst. Growth. 2021. V.574. 126312.

## 20 - Физика и экология. Экологические проблемы в энергетике

Бобылев Вячеслав Александрович, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Физический

**Изменение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах зоны наблюдения Ростовской АЭС**

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

e-mail: [slava\\_bobelev@mail.ru](mailto:slava_bobelev@mail.ru) стр. 171

Дергачева Анастасия Валерьевна, магистрант 1 года обучения

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Институт наук о Земле

**Годовая эффективная доза облучения от радионуклидов в почвах г. Новочеркаска, Ростовская область**

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

e-mail: [anastasyadergacheva@yandex.ru](mailto:anastasyadergacheva@yandex.ru) стр. 172

Деревяга Данил Евгеньевич, 3 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Радиационная обстановка на территориях населённых пунктов Родионово-Несветайского района Ростовской области**

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

e-mail: [derevyaga@sfedu.ru](mailto:derevyaga@sfedu.ru) стр. 174

Дубров Никита Иванович, 3 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Радиационная обстановка на территории пос. Донской в районе расположения Новочеркасской ГРЭС**

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

e-mail: [nikita.dubrov@bk.ru](mailto:nikita.dubrov@bk.ru) стр. 175

Есин Егор Сергеевич, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Радиоэкологическое обследование территорий Кавказских Минеральных Вод Ставропольского края**

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

e-mail: [egesserg@mail.ru](mailto:egesserg@mail.ru) стр. 176

Калашникова Карина Александровна, 3 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в малых городах Ростовской области**

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

e-mail: [kalashnikoa.karina@mail.ru](mailto:kalashnikoa.karina@mail.ru) стр. 178

Козенко Олег Александрович, 3 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на территории г. Таганрога Ростовской области**

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

e-mail: [oleg.cozenko@yandex.ru](mailto:oleg.cozenko@yandex.ru) стр. 179

Маломыжева Наталья Викторовна, магистрант 1 года обучения

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Сравнительный анализ мощности эквивалентной дозы излучения в пределах каштановой и черноземной почвенных зон, расположенных на особо охраняемых природных территориях Ростовской области**

Бураева Елена Анатольевна,

e-mail: [llia.2013@yandex.ru](mailto:llia.2013@yandex.ru) стр. 180

Плахотняя Дарья Павловна, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

**Распределение гамма-фона на территориях городов и поселений Краснодарского края**

Бураева Елена Анатольевна,

e-mail: [dplakhotnyaya@bk.ru](mailto:dplakhotnyaya@bk.ru) стр. 181

Ревнивцев Илья Сергеевич, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Радиоэкологическая обстановка на территории г. Волгодонска Ростовской области**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [ahk063@gmail.com](mailto:ahk063@gmail.com) стр. 182

Сайфудинов Тимур Каноатшохович, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Мониторинг радиационной обстановки в зоне наблюдения Ростовской АЭС**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [tima.saufydionv2001@gmail.com](mailto:tima.saufydionv2001@gmail.com) стр. 183

Сенин Илья Николаевич, 3 курс  
Тихорецк, Южный федеральный университет, физический  
**Радиационная обстановка на территории г. Тихорецка Краснодарского края**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [senjokusa@gmail.com](mailto:senjokusa@gmail.com) стр. 185

Сивцов Алишер Викторович, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Анализ распределения естественных радионуклидов в антропогенно-преобразованных и нативных почвах Ростовской области**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [Sivtsov1999@list.ru](mailto:Sivtsov1999@list.ru) стр. 186

Сидорина Ульяна Андреевна, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Радионуклиды в листовой подстилке широколиственных лесов (на примере горной Адыгеи)**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [ulianasidorina72@gmail.com](mailto:ulianasidorina72@gmail.com) стр. 187

Шадин Антон Евгеньевич, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в г. Ростове-на-Дону**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [antonshadin@yandex.ru](mailto:antonshadin@yandex.ru) стр. 189

Шаповалов Егор Сергеевич, 3  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Радиационная обстановка населённых пунктов Ростовской области на примере села Алексево-Лозовского Чертковского района**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [yegor.shapovalov.01@mail.ru](mailto:yegor.shapovalov.01@mail.ru) стр. 190

Швецова Дарья Алексеевна, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах особо охраняемых природных территорий Ростовской области**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [dashik.shvet@yandex.ru](mailto:dashik.shvet@yandex.ru) стр. 191

Ширяева Анастасия Андреевна, 1 курс  
Ростов-на-Дону, Южный Федеральнй университет, физический  
**Анализ содержания  $^{137}\text{Cs}$  в различных типах почвы в горных районах Республики Адыгея**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [anastasia.shiryayeva00@mail.ru](mailto:anastasia.shiryayeva00@mail.ru) стр. 193

Шульга Всеволод Владимирович, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения станиц Краснодарского края на примере станицы Староминской**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [ssevashulga@mail.ru](mailto:ssevashulga@mail.ru) стр. 194

## Изменение удельной активности $^{137}\text{Cs}$ в почвах зоны наблюдения Ростовской АЭС

**Бобылев Вячеслав Александрович**  
Костырев Борис Павлович, Павленко Алексей Сергеевич  
Южный федеральный университет  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
[slava\\_bobelev@mail.ru](mailto:slava_bobelev@mail.ru)

В настоящее время многие предприятия ядерной топливной энергетики могут быть потенциальными источниками поступления в окружающую среду искусственных радионуклидов (ИРН). В Ростовской области таким предприятием является Ростовская (Волгодонская) АЭС (РоАЭС).

Целью данной работы является изучение распределения искусственного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвах тридцатикилометровой зоны наблюдения Ростовской АЭС. Объектами исследования настоящей работы является почвы степной зоны данного региона, находящиеся в 30 километровой зоне наблюдения Ростовской АЭС. Пробы почв отбирались каждый год на протяжении более 20 лет с 1999 года в летний сухой период. Перед отбором проб на всех контрольных участках зоны наблюдения РоАЭС выполнялась гамма-дозиметрия с использованием дозиметров-радиометров типа ДРБП-03, СРП-88н, ДКС-96. Удельную активность радионуклидов в почвах определяли на гамма-спектрометре «Прогресс-гамма сцинтилляционный». Использовали стандартные методики отбора и подготовки проб почвы.

Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, гамма-фон) (рис.1) на территории РоАЭС не подчиняется ни нормальному, ни логнормальному распределению. Гамма-фон в зоне наблюдения РоАЭС с 2000 по 2021 гг. не изменяется и в среднем составляет 0,13-0,14 мкЗв/ч, что не превышает гамма-фон, рекомендуемый Нормами радиационной безопасности [1], с максимальным значением в 0,3 мкЗв/ч. Полученные данные совпадают с [2] и не превышают результаты предпускового радиэкологического мониторинга («нулевого фона») зоны наблюдения РоАЭС, проводимого в 1999-2000 годах.

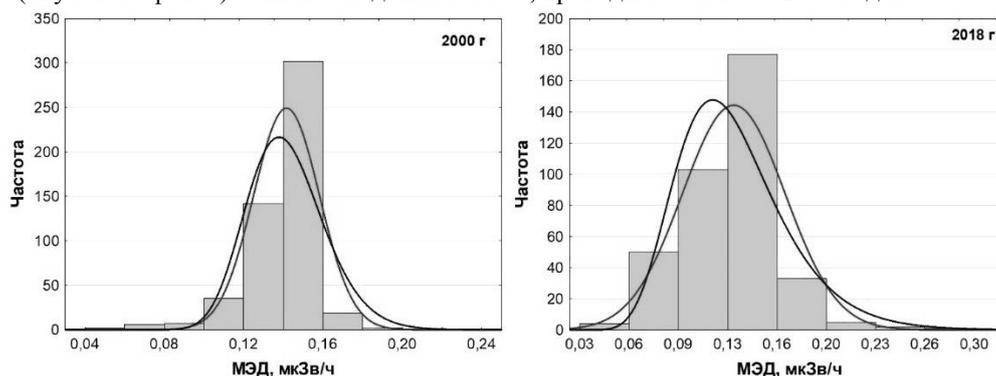


рис.1. Диаграмма распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на высоте 1 метр от поверхности почвы в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (рис.2) близко к логнормальному распределению. Удельная активность радиоцезия за 2018 год варьируется в достаточно широких диапазонах с 1 до 54 Бк/кг, при среднем, модальном и медианном 6-15 Бк/кг. Данные значения не превышают «нулевой фон» (1999-2000 год) и среднемировых значений удельной активности [3,4] радиоцезия в почвах.

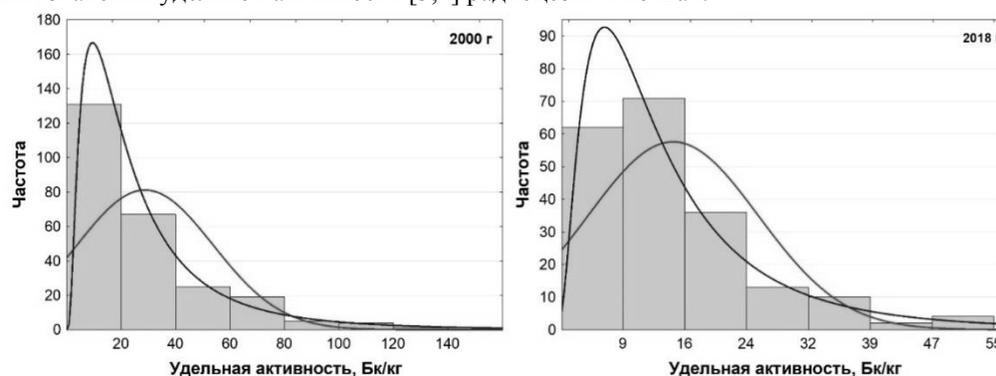


рис.2. Диаграмма распределения  $^{137}\text{Cs}$  в 0–10 см слое почвы Ростовской АЭС

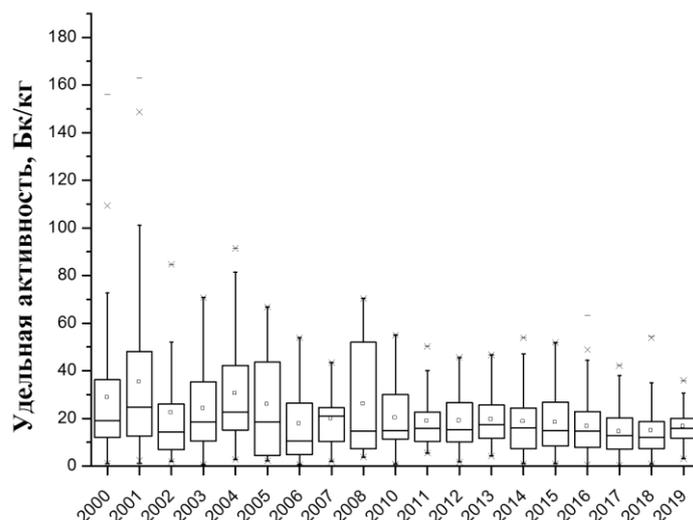


рис.3. Содержание <sup>137</sup>Cs в 0–10 слое почвы в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Для зоны наблюдения РоАЭС содержание <sup>137</sup>Cs в верхнем слое почвы (0–10 см) непрерывно снижается (рис.3), при этом, основной запас <sup>137</sup>Cs сосредоточен в верхних слоях почвы. Такое многолетнее поведение радиоцезия в верхнем слое почвы связано с его естественным распадом, выносом растительностью и перераспределением <sup>137</sup>Cs по почвенному профилю, за счет его миграции в результате собственной диффузии и конвективного переноса, как водорастворимой форме, так и в результате чередования обильных осадков и засушливых периодов. Изменения данного радионуклида в отдельные годы обусловлены климатическими особенностями региона в период отбора проб. Длительные засухи способствуют накоплению <sup>137</sup>Cs в верхнем слое почвы, обильные осадки – промыванию данного радионуклида вглубь почвенного профиля.

В целом, за многолетний период наблюдения удельная активность <sup>137</sup>Cs непрерывно снижается. В дальнейших исследованиях, для оценки влияния Ростовской АЭС на содержание радиоцезия в почвах будет оценен его суммарный запас по глубине почвенного профиля.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

- [1] СанПин 2.6.1.2523-09 *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)*. Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г № 47 с 01 сентября 2009 г.
- [2] В.М. Шершаков, Булгаков В.Г., Крышев И.И., Вакуловский С.М., Каткова М.Н., Ким В.М., Крышев А. И. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году // Обнинск – 2019 – С. 228-234.*
- [3] A. M. Hejl, G.D. Roger Ottmar, J. Timothy, T. P Eddy, S.L. Rathbun, A. A. Commodore, J. L. PearceL. P. *Naeher Radionuclide activity concentrations in forest surface fuels at the Savannah River Site // Journal of Environmental Management – 2013 – №115 – P. 217-226.*
- [4] Marie Edena, Bernhard Felbermeierb, Reinhard Mosandlb, Jörg Völkela. *Vertical distribution of 137Cs in the contaminated soil of a spruce forest in southern Germany 12 years after regeneration cutting // Forest Ecology and Management – 2017 – №406 – P. 402-409.*

## Годовая эффективная доза облучения от радионуклидов в почвах г. Новочеркасска, Ростовская область

**Дергачева Анастасия Валерьевна**  
 Горбунов Алексей Сергеевич, Огиенко Артем Вадимович  
 Южный федеральный университет  
 Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
[anastasyadergacheva@yandex.ru](mailto:anastasyadergacheva@yandex.ru)

Новочеркасск является крупным промышленным городом на территории Ростовской области. В его черте находится множество предприятий, загрязняющих окружающую среду, самые крупные из которых: филиал ОАО «ОГК – 2» Новочеркасская ГРЭС (НЧГРЭС), ОАО «ЭПМ – Новочеркацкий электродный завод»

(НЭЗ), ООО «ПК Новочеркасский электровозостроительный завод» (НЭВЗ). Особый интерес представляет НчГРЭС, работающая на угле. Отходы, образованные в результате деятельности станции, могут содержать естественные радионуклиды (ЕРН), которые оседают на городскую территорию, в частности, почву. Итак, целью работы является оценка годовой эффективной дозы облучения человека от радионуклидов в почвах г. Новочеркасска.

Внешнее облучение на открытом воздухе возникает из-за земных радионуклидов, присутствующих в некоторых количествах во всех почвах. Основными компонентами внешнего гамма-излучения являются радионуклиды серии  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ . Именно данные ЕРН вносят основной вклад в дозу облучения человека, как на открытом воздухе, так и в помещении.

Так, в докладе UNSCEAR 2000 годовая эффективная доза от естественных радионуклидов ( $HNR$ , мЗв) рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$HNR = DNR \times a \times b \times c, \quad (1)$$

где  $DNR$  - мощность поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью земли для ЕРН;  $a$  - количество часов в году (8760 ч);  $b$  - коэффициент, численное значение которого составляет 0,2 или 0,8 снаружи и внутри помещения соответственно;  $c$  - коэффициент преобразования поглощенной дозы в воздухе в эффективную дозу, полученную взрослыми, равный 0,7 (Зв/Гр). Мощность поглощенной дозы гамма-излучения для ЕРН ( $DNR$ , нГр/ч) оценивается по следующей формуле:

$$DNR = d \times ARa \times e \times ATh \times f \times AK, \quad (2)$$

где  $ARa$ ,  $ATh$  и  $AK$  - средние удельные активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  (Бк/кг) соответственно;  $d$ ,  $e$ ,  $f$  - коэффициенты для преобразования активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в дозы (0,462, 0,604 и 0,0417 (нГр / ч на Бк / кг) соответственно).

На формирование дозы вне помещений также влияет искусственный радионуклид (ИРН)  $^{137}\text{Cs}$ . Годовая эффективная доза облучения от  $^{137}\text{Cs}$  ( $HCs$ , мкЗв) рассчитывается по формуле:

$$HCs = g \times SCs, \quad (3)$$

где  $g$  - дозовый коэффициент для расчета среднегодовой эффективной дозы при облучении человека от подстилающей поверхности, численное значение составляет 6 мкЗв/ч на кБк/м<sup>2</sup> для взрослого населения;  $SCs$  - средняя поверхностная активность  $^{137}\text{Cs}$  в образцах почвы.

Формула для расчета средней поверхностной активности  $^{137}\text{Cs}$  (кБк/м<sup>2</sup>):

$$SCs = ACs \times \frac{m}{s}, \quad (4)$$

где  $ACs$  - активность  $^{137}\text{Cs}$  в образце (Бк/кг);  $m$  - масса образца (кг);  $s$  - площадь прикипки (м<sup>2</sup>).

Суммарная годовая эффективная доза от ЕРН и  $^{137}\text{Cs}$  в почве ( $AEDE$ , мЗв) оценивается по формуле:

$$AEDE = HNR + HCs. \quad (5)$$

Таким образом, в результате данной работы, годовая эффективная доза облучения на открытом воздухе от ЕРН составила 0,052 мЗв, в помещении 0,21 мЗв, а мощность поглощенной гамма-дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью земли 43,2 нГр/ч. Годовая эффективная доза от искусственного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , содержащегося в почвах, составила 2,28 мкЗв (0,0028 мЗв). В итоге, суммарная годовая эффективная доза равна 0,26 мЗв/год, что не превышает среднемирового значения 0,48 мЗв [1].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

[1] *Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly, Vol. I: Sources. UN, NY, 2000. 654 p*

## Радиационная обстановка на территориях населённых пунктов Родионово-Несветайского района Ростовской области

*Деревяга Данил Евгеньевич*

*Козенко Олег Александрович*

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.*

*[derevyaga@sfedu.ru](mailto:derevyaga@sfedu.ru)*

Работа посвящена оценке распределения гамма-фона (мощности эквивалентной дозы гамма-излучения, мкЗв/ч) в населённых пунктах Родионово-Несветайского района Ростовской области. Данное исследование обусловлено тем, что в Родионово-Несветайском районе имеется нефтеперекачивающая станция, а также оживленная трасса «Ростов — Новошахтинск». Это может оказывать влияние на гамма-фон региона.

Измерения мощности эквивалентной дозы проводились на открытых территориях населённых пунктов. В качестве контрольных участков были выбраны самые оживленные улицы. Измерения проводились дозиметром-радиометром ДКС-96, а также СРП-88, использовались стандартные методики измерения. Ниже, на рис. 1 и рис. 2 представлены особенности распределения мощности эквивалентной дозы по всем населённым пунктам Родионово-Несветайского района (где БД – х. Большой Должик, Д – х. Дарьевка, НТ – х. Новотроицкий, П – х. Павленков, РН – сл. Родионово-Несветайская).

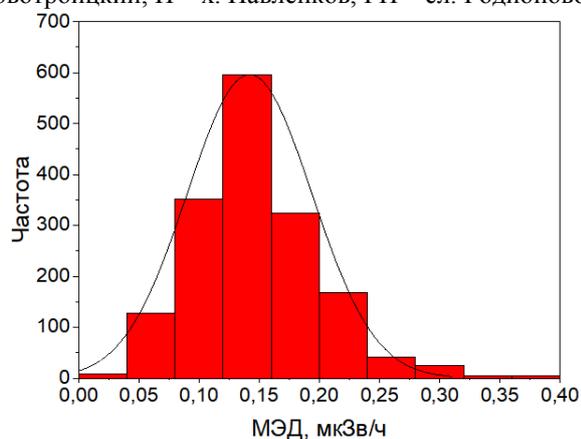


рис. 1 Распределение МЭД в населенных пунктах Родионово-Несветайского района

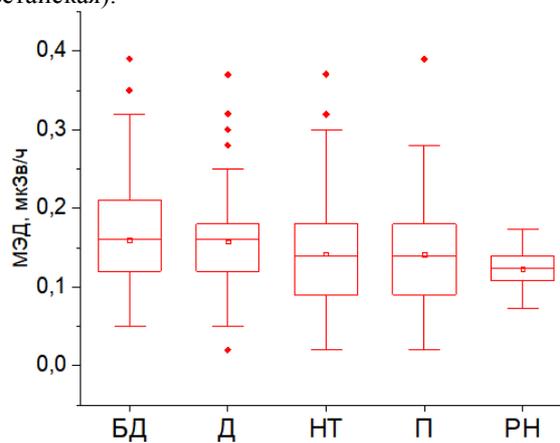


рис. 2 Мощность эквивалентной дозы в каждом из населенных пунктов

Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на открытых территориях подчиняется нормальному закону распределения. Гамма-фон в населенных пунктах Родионово-Несветайского района распределен равномерно. Анализ распределения МЭД для различных населённых пунктов приведён в таблице (где БД – х. Большой Должик, Д – х. Дарьевка, НТ – х. Новотроицкий, П – х. Павленков, РН – сл. Родионово-Несветайская):

Параметр	БД	Д	НТ	П	РН
Минимум, мкЗв/ч	0,05	0,02	0,02	0,02	0,07
Максимум, мкЗв/ч	0,39	0,37	0,37	0,39	0,17
Среднее, мкЗв/ч	0,16	0,16	0,14	0,14	0,12
Мода, мкЗв/ч	0,14	0,16	0,14	0,12	0,13
Медиана, мкЗв/ч	0,16	0,16	0,14	0,14	0,12
Стандартная ошибка	0,003	0,003	0,004	0,003	0,001

Широкие вариации гамма-фона могут быть обусловлены как достаточно сложным геологическим строением региона, так и степенью урбанизации. В целом среднее, модальное и медианное значения МЭД во всех населённых пунктах не превышают Нормы радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ-99/2009) – 0,3 мкЗв/ч. Участков с повышенным уровнем МЭД не выявлено. Гамма-фон характерен для Ростовской области с умеренно-континентальным климатом.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

## Радиационная обстановка на территории пос. Донской в районе расположения Новочеркасской ГРЭС

Дубров Никита Иванович

Шапалов Егор Сергеевич, Шульга Всеволод Владимирович, Деревяга Данил Евгеньевич

Южный федеральный университет

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

[nikita.dubrov@bk.ru](mailto:nikita.dubrov@bk.ru)

В крупных городах с большим количеством населения и развитой инфраструктурой мониторинг экологического (и радиоэкологического) состояния окружающей среды ведётся регулярно, но работ по радиационной обстановке на территории сельских поселений в районе расположения станций или каких-либо предприятий не много. Данная работа сможет дать более полное понимание того, как изменяется радиационный фон в сельских поселениях вблизи промышленных предприятий (например, теплостанций, на примере Новочеркасской ГРЭС). Работы, подобные этой, актуальны, так как данные для статистики всегда должны дополняться и обновляться для более точного анализа состояния окружающей среды.

По воздействию на окружающую среду угольная промышленность остаётся одной из наиболее сложных отраслей горнодобывающей промышленности. Поскольку производство и экономика развивается, необходимость в угле растёт в больших объёмах, так же как и его добыча. Самыми явными негативными последствиями являются: загрязнение подземных и поверхностных вод, загрязнение воздушного бассейна и почв. Именно поэтому влияние угольной промышленности на радиационный фон весьма существенно и требует большого внимания. Необходимо своевременно выявлять изменения радиационной обстановки, а также проводить оценку, прогнозирование и предупреждение возможных негативных последствий радиационного воздействия на населения и окружающую среду [1-4].

Объектом исследования является пос. Донской в районе расположения Новочеркасской ГРЭС Ростовской области. Посёлок полностью состоит из домов, построенных из кирпича или железобетонных панелей. Отопление в домах централизованное (подаётся от Новочеркасской ГРЭС). Коттеджный посёлок отапливается индивидуальными газовыми котлами. Большинство дорог микрорайона имеют асфальтовое покрытие. Также к Новочеркасской ГРЭС подходят подводящий и сбросной каналы, которые не являются природными сооружениями, но тем не менее могут значительно повлиять на окружающую среду вблизи микрорайона. Донской окружён полями сельскохозяйственного назначения. Помимо этого, рядом с посёлком находятся дачные и гаражные кооперативы. На востоке микрорайона есть коттеджный посёлок. Недалеко от Донского расположено несколько предприятий, влияющих на окружающую среду. Градообразующим предприятием является Новочеркасская ГРЭС. Также на территории влияния находятся Новочеркасский завод строительных материалов (НЗСМ) и завод упаковки (ООО Кэнпак Завод упаковки). В 20 километрах от посёлка находится заповедник Золотые Горы.

Работа посвящена проведению анализа данных, полученных методом пешеходной гамма-съёмки и оценки радиационной обстановки на территории пос. Донской в районе расположения Новочеркасской ГРЭС Ростовской области. Была проведена пешеходная гамма-съёмка – измерения гамма-фона (мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч)), проводимые на высоте 100 см от поверхности. Для сбора данных использовался дозиметр-радиометр СРП-88. Методика измерений гамма-фона на открытой местности и в жилых помещениях использовались стандартные [5-8]. Ниже на *рис. 1* и в таблице представлены данные по распределению МЭД гамма-излучения в районе исследования.

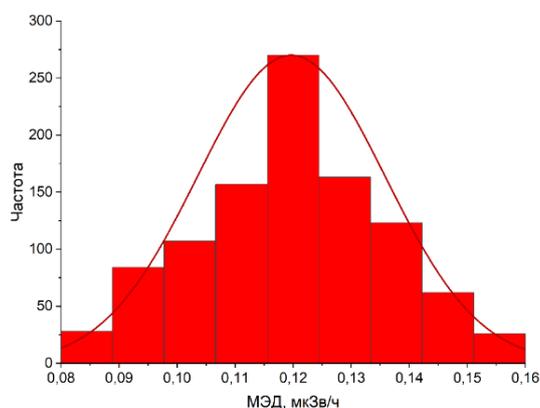


рис. 1. МЭД на территории пос. Донской

Параметр	Значение
Минимум, мкЗв/ч	0,081
Максимум, мкЗв/ч	0,157
Среднее арифметическое, мкЗв/ч	0,120
Среднее геометрическое, мкЗв/ч	0,119
Мода, мкЗв/ч	0,124
Медиана, мкЗв/ч	0,122
Стандартная ошибка	0,0005
Стандартное отклонение	0,016
Дисперсия выборки	0,0003
Экссесс	-0,456
Асимметричность	-0,139
Количество измерений	1020

В целом представленные в работе результаты исследований радиационной обстановки в сельских поселениях, прилегающих к Новочеркасской ГРЭС показывают, что гамма-фон в регионе характерен для Ростовской области, соответствует Нормам радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ-99/2009) [9-10].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

- [1] Kardan, M. R. A national survey of natural radionuclides in soils and terrestrial radiation exposure in Iran. / M. R. Kardan, N. Fathabdi, A. Attarilar, M. T. Esmaili-Gheshlaghi, M. Karimi, A. Najafi, S. S. Hosseini. – Iran: Elsevier Ltd. 2017 – 168-176 с.
- [2] Исабекова, К. С. Радиоэкологический мониторинг окружающей среды на территории угольного месторождения "Каражыра". / К. С. Исабекова С. М. Кудеринов, Е. Н. Сембаев, Н. А. Кудеринова, Г. Б. Оразбекова, Г. С. Сейтказина. – Сибирь: Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018 – 7 с.
- [3] Масаев, Ю. А. Влияние развития угледобычи на экологическую обстановку в Кузбассе. / Ю. А. Масаев, А. И. Копытов, В. Ю. Масаев, М. А. Яковченко. – Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019 – 68 – 76 с.
- [4] Сидорова, Г. П. Радиационная обстановка в районах расположения угольных ТЭС России. / Г. П. Сидорова, Д. А. Крылов, Н. В. Овчаренко. – Вестник ЗабГУ. 2017 – 36 – 44 с.
- [5] МВК 2.2.3(50)-11 Методика дозиметрического контроля территории на участках застройки // РнД: типография ЮФУ. 2011. 15с.
- [6] МУ 2.6.2398-08 Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности // М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009. 27с.
- [7] МВК 5.6(38)-11 Методика дозиметрического контроля объектов, содержащих ЕРН // Ростовна-Дону: типография ЮФУ, 2011. – 13с.
- [8] ЖШП.289.386 ПС Прибор геологоразведочный сцинтилляционный СРП-88Н. Паспорт.
- [9] СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) // Министерство юстиции Российской Федерации. 2009.
- [10] СанПиН 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) // Министерство юстиции Российской Федерации. 2010.

## **Радиоэкологическое обследование территорий Кавказских Минеральных Вод Ставропольского края**

**Есин Егор Сергеевич**

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.*

*egesserg@mail.ru*

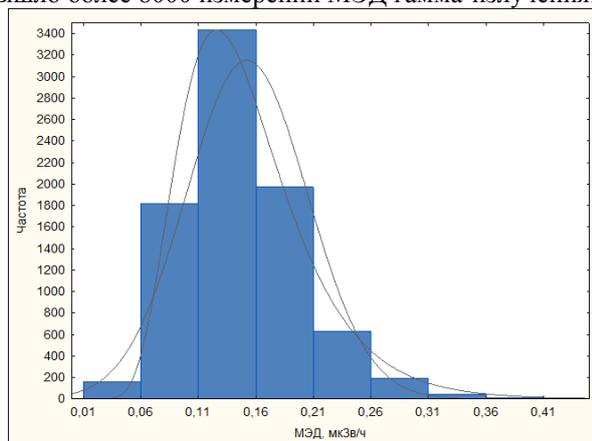
Кавказские Минеральные Воды (КМВ) – это группа городов-курортов на юге России (Ставропольский край). Эти города известны природой и лечебными свойствами горных источников. Пятигорск – главный город объединения, является крупнейшим городом после Ставрополя по численности населения в крае и крупнейшим по тому же параметру на территории КМВ. На территории КМВ нет большого количества промышленных предприятий. Несмотря на это мониторинг местной радиоэкологической обстановки необходим из-за наличия объектов, потенциально представляющих угрозу здоровью населения. Это бывшие рудники № 1 и № 2 по

добыче урановых руд, а также хвостохранилище после разработок урановой руды бывшего НПО «Алмаз» в г. Лермонтов [1]. Мониторинг местной радиационной обстановки еще необходим, как мера, предупреждающая о возможной опасности местные властные органы, а также людей, как местных, так и туристов.

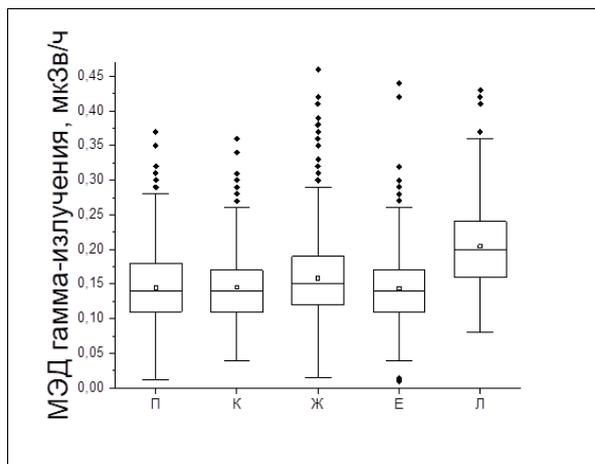
Целью работы была оценка распределения гамма-фона (мощности эквивалентной дозы гамма-излучения; МЭД, мкЗв/ч) на территориях таких городов-курортов КМВ, как: Пятигорск (П), Кисловодск (К), Железноводск (Ж), Ессентуки (Е) и Лермонтов (Л). Также был проведен анализ содержания радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) в пробах почвы г. Пятигорска.

Отбор проб почвы проводился методом конверта. Закладывался квадратный участок со стороной 10 м. Каждая из проб отбиралась на глубине 10 см. Далее, после обработки удельные активности всех радионуклидов измерялись при помощи гамма-спектрометра «Прогресс-Гамма».

Гамма-дозиметрия проводилась в туристических и жилых зонах вышеперечисленных городов-курортов КМВ. Измерения МЭД гамма-излучения на обозначенных территориях проводились методом пешеходной гамма-съемки на высоте 1 метр над землей при помощи дозиметров-радиометров «ДКС-96» и «ДРБП-03». Всего вышло более 8000 измерений МЭД гамма-излучения.



а



б

рис. 1. Распределение МЭД гамма-излучения на территории КМВ (а) и городов КМВ отдельно (б)

Параметр	Значение МЭД гамма-излучения, мкЗв/ч					
	Общее	Пятигорск	Кисловодск	Железноводск	Ессентуки	Лермонтов
Среднее значение	0.15	0.14	0.15	0.16	0.14	0.20
Стандартная ошибка	0.0006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003
Минимальное значение	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.08
Максимальное значение	0.46	0.37	0.36	0.46	0.44	0.43
Мода	0.14	0.14	0.12	0.14	0.13	0.19
Медиана	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.20

Выше, на рис. 1 и в таблице приведены результаты статистической обработки данных МЭД гамма-излучения на территории КМВ. По полученным результатам можно сказать, что МЭД гамма-излучения в значении, регламентированных Нормами радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ 99/2009), не превышает. Результаты, полученные в настоящей работе сопоставимы с данными, полученными ранее в работе [2] (0,15-0,30 мкЗв/ч). Редкие превышения НРБ-99/2009 обусловлены либо повышенным содержанием естественных дозообразующих радионуклидов, либо загрязненностью улиц автомобильным транспортом. Также, следует отметить, что средние МЭД в городах КМВ примерно до двух раз выше, чем на равнинных территориях, что вызвано влиянием космического излучения и солнечной радиации на разной высоте над уровнем моря. Повышенные значения гамма-фона, по сравнению с другими городами, было обнаружено в Лермонтове. В случае этого города повышенный фон можно объяснить его близостью к объектам, служившим в прошлом для добычи урана, но для этого нужны дополнительные исследования.

Значения удельной активности радионуклидов в почве также не показали превышения среднемировых показателей. Так, средняя удельная активность для  $^{137}\text{Cs}$  составила 11,1 Бк/кг, для  $^{232}\text{Th}$  – 21,7 Бк/кг, для  $^{226}\text{Ra}$  – 21,5 Бк/кг, а для  $^{40}\text{K}$  – 328,8 Бк/кг.

Можно сделать вывод о том, что радиоэкологическая ситуация на территории большинства городов КМВ находится в норме. Необходимо дополнительное наблюдение за радиационной обстановкой в г. Лермонтов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

[1] Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Ставропольском крае в 2011 году». 2011. 199 с.

[2] L. I. Khorzova. // *Procedia engineering*. 2016. № 150. P. 2031-2035.

## **Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в малых городах Ростовской области**

**Калашникова Карина Александровна**  
Южный федеральный университет  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
[kalashnikoa.karina@mail.ru](mailto:kalashnikoa.karina@mail.ru)

В Ростовской области еще с 50-х годов начали развиваться производства и технологии, приводящие к выбросу радиоактивных веществ и/или являющиеся источниками ионизирующего излучения. Ионизирующее излучение негативно сказывается, в первую очередь, на здоровье человека. Гамма-фон может меняться в ряде причин. На его изменение могут повлиять перепады погодных условий, работа предприятий по производству ядерного топлива, центры по урановым разработкам, содержание радионуклидов в почве, распад радона и т. д. Именно поэтому важно и нужно следить за радиационной обстановкой местности, находить способы контроля гамма-фона на характерных для региона уровнях. Необходимо отметить, что контроль за природным радиоактивным фоном, как правило, проводится в крупных промышленных областных центрах. При этом, численность населения в поселках городского типа и малых городах интенсивно растет. Поэтому исследование гамма-фона в малых городах является актуальной и важной проблемой современного мира.

Измерения проводились с помощью дозиметра-радиометра ДКС-96 [1] и дозиметра-радиометра ДРБП-03 [2] методом пешеходной гамма-съемки на высоте 100 см от поверхности земли. Исследования проводились в таких городах Ростовской области, как Новочеркасск, Волгодонск, Батайск, Сальск, Новошахтинск, Азов, Донецк, Цимлянск, Аксай. Ниже, в таблице, представлены результаты статистической обработки данных по измеренной мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) в данных населенных пунктах (НЧ-Новочеркасск, ВД-Волгодонск, Б-Батайск, С-Сальск, НШ-Новошахтинск, А-Азов, Д-Донецк, Ц-Цимлянск, АК-Аксай).

Параметр	НЧ	ВД	Б	С	НШ	А	Д	Ц	АК
Минимум	0,02	0,01	0,02	0,02	0,05	0,01	0,05	0,05	0,01
Максимум	0,23	0,12	0,3	0,3	0,26	0,26	0,3	0,24	0,51
Среднее	0,11	0,09	0,13	0,13	0,14	0,12	0,18	0,13	0,13
Стандартная ошибка	0,01	0,0004	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,003	0,002
Медиана	0,12	0,09	0,14	0,14	0,13	0,12	0,18	0,13	0,14
Мода	0,07	0,09	0,18	0,18	0,12	0,1	0,17	0,13	0,12
Стандартное отклонение	0,05	0,02	0,07	0,07	0,04	0,05	0,05	0,03	0,05
Дисперсия выборки	0,002	0,001	0,005	0,005	0,002	0,002	0,002	0,001	0,003

Как видно из таблицы – максимальная МЭД гамма-излучения зафиксирована в Донецке. Это может быть обусловлено как наличием угольных месторождений в непосредственной близости (добыча угля может сопровождаться повышением радиации за счет выноса на поверхность пород глубокого залегания с

повышенным содержанием радионуклидов). Не исключено использование стройматериалов с повышенным содержанием радионуклидов.

В целом, значения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения сопоставимы с Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) и характерны для Ростовской области.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

[1] ТЕ1.415313.003РЭ Дозиметры-радиометры ДКС-96. Паспорт. Руководство по эксплуатации.

[2] ГКПС 14. 00.00.000 ПС. Дозиметр-радиометр ДРБП-03 с блоками детектирования БДГ-01 и БДБА-02. Паспорт (Техническое описание, инструкция по эксплуатации, формуляр).

## Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на территории г. Таганрога Ростовской области

*Козенко Олег Александрович*

*Деревяга Данил Евгеньевич*

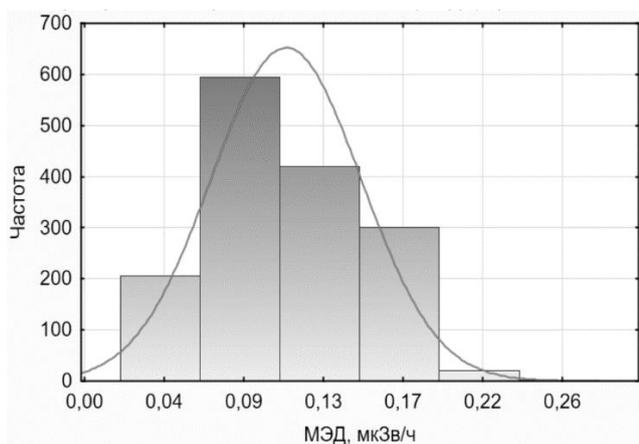
*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.*

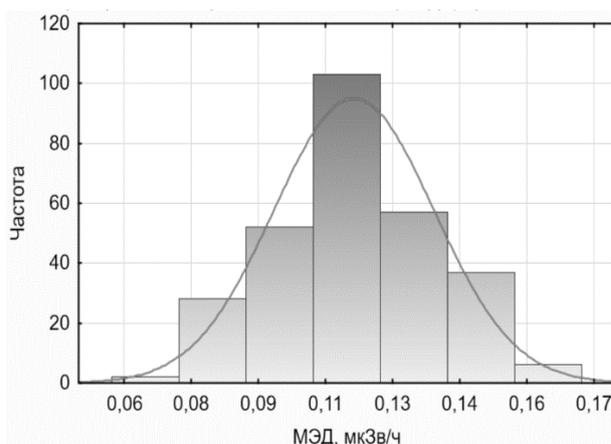
*[oleg.cozenko@yandex.ru](mailto:oleg.cozenko@yandex.ru)*

Работа посвящена оценке распределения гамма-фона (мощности эквивалентной дозы гамма-излучения, мкЗв/ч) на территории г. Таганрог Ростовской области. Донное исследование обусловлено тем, что на территории г. Таганрога находятся 2 крупных завода металлургической промышленности: ПАО «Красный котельщик» и АО «ТАГМЕТ». Также имеется крупный торговый порт, являющийся одним из ключевых морских грузовых операторов Азовского бассейна. Также в регионе расположена Ростовская АЭС. Следовательно, оценка радиационной безопасности города важна в условиях активной деятельности любых промышленных предприятий.

Измерения гамма-фона проводились как на открытых территориях – вдоль улиц с различной степенью загруженности автотранспортом, так и в ряде частных домовладений (преимущественно, в квартирах). Использовали дозиметр-радиометр ДКС-96 и стандартные методики исследования. Ниже, на *рис. 1* и *рис. 2* представлены особенности распределения МЭД на открытой местности и в помещениях г. Таганрога.



*рис.1 Распределение  $\gamma$ -фона на территории г. Таганрога на открытом пространстве*



*рис. 2 Распределение  $\gamma$ -фона в помещениях на территории г. Таганрога*

Распределение гамма-фона на открытой местности г. Таганрога строго не подчиняется ни нормальному, ни логарифмически нормальному законам распределения (*рис. 1*). При этом в жилых помещениях распределение МЭД гамма-излучения подчиняется нормальному закону распределения (это подтверждается довольно низким значением критерия Хи-квадрат и р-значением, равным 0,02880). Это может быть обусловлено тем, что данные гамма-фон на открытой местности в различных частях города, среди которых были как спальные, так и промышленные район, центральная часть города. Районы г. Таганрога различаются степенью загрузки автотранспортом, используемыми строительными материалами, дорожным покрытием.

Следовательно, существует некоторая зависимость мощности эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения от характеристик окружающей среды. Анализ распределения МЭД для различных территорий г. Таганрога приведены в таблице:

Расположение /Параметр	Минимум, мкЗв/ч	Максимум, мкЗв/ч	Среднее, мкЗв/ч	Мода, мкЗв/ч	Медиана, мкЗв/ч	Стандартная ошибка
На открытых территориях	0,01	0,24	0,11	0,07	0,12	0,001
В жилых помещениях	0,07	0,16	0,12	0,13	0,12	0,001

В целом, среднее, модальное и медианное значения МЭД как на открытых территориях г. Таганрога, так и в жилых помещениях не превышает Нормы радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ-99/2009) – 0,3 мкЗв/ч. Участков с повышенным гамма-фоном не выявлено. Гамма-фон характерен для Ростовской области с умеренно-континентальным климатом.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

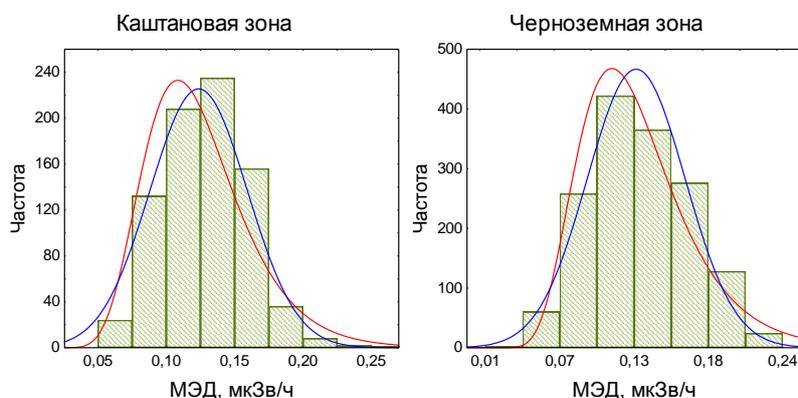
## **Сравнительный анализ мощности эквивалентной дозы излучения в пределах каштановой и черноземной почвенных зон, расположенных на особо охраняемых природных территориях Ростовской области**

*Маломыжева Наталья Викторовна  
Швецова Дарья Алексеевна, Джюра Кирилл Олегович  
Южный федеральный университет  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
[llia.2013@yandex.ru](mailto:llia.2013@yandex.ru)*

Объектом данного исследования являлся приземный слой воздуха особо охраняемых территорий Ростовской области: Ботанический сад (БС) Южного федерального университета (ЮФУ), природный биосферный заповедник «Ростовский» (ЗР), Персиановская заповедная степь (ПСС), урочище «Черная Балка» (ЧБ), Приазовская заповедная степь (АС), а также урочище «Каменная Балка» (КБ)

Целью работы – является проведение сравнительного анализа радиоэкологического состояния ООПТ с дифференциацией по принадлежности данных территорий к почвенным зонам. Сравнение проводилось с помощью t-критерия Стьюдента [1, 2], с предварительной проверкой на соответствие законам распределения с помощью критерия Крамера-Мизеса-Смирнова [3].

Рассматриваемые рекреационные территории Ростовской области находятся преимущественно в двух почвенных зонах: каштановой (КЗ) и черноземной (ЧЗ). Известно, что естественный гамма-фон территории зависит от типа почв. В каштановой почвенной зоне располагается рекреационная территория ЗР, к черноземной зоне относятся БС, ЗР, ПСС, АС, КБ. На *рис.1* представлены частотные гистограммы распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) в зависимости от почвенной зоны.



*рис.1. Частотные гистограммы мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на ООПТ в зависимости от типа почвенной зоны*

Проверка распределения МЭД гамма-излучения на ООПТ Ростовской области на соответствие законам распределения показала, что при 0,01 уровне значимости распределения гамма-фона не подчиняются ни нормальному, ни логнормальному законам. Поэтому в данной работе будут использоваться модальные значения МЭД. Таким образом, значения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения для ООПТ на каштановой и черноземной зонах составляют соответственно 0,135 мкЗв/ч и 0,132 мкЗв/ч и не превышают Норм радиационной безопасности НРБ-99/2009 (0,30 мкЗв/ч) [4]

Статистический анализ показал, что в зависимости от типа почвенной зоны наблюдается статистически значимое различие в среднем значении мощности эквивалентной дозы гамма-излучения. Данное различие для каштановой и черноземной зон на рекреационных территориях Ростовской области составляет 0,003 мкЗв/ч. Данное различие может быть обусловлено неопределенностью измерений, которая составляет 0,02 мкЗв/ч.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

[1] Гаральд Крамер. *Математические методы статистики*. М.: Мир, 1975.

[2] Кобзарь А.И. *Прикладная математическая статистика*. М.: Физматлит, 2006.

[3] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: Пер. с нем.* М.: Наука, 1980.

[4] СанПин 2.6.1.2523-09 *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)*. Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г. № 47 с 01 сентября 2009 г.

## **Распределение гамма-фона на территориях городов и поселений Краснодарского края**

***Плахотняя Дарья Павловна***

***Костырев Борис Павлович, Шульга Всеволод Владимирович***

***Южный федеральный университет***

***Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.***

***[dplakhotnyaya@bk.ru](mailto:dplakhotnyaya@bk.ru)***

Необходимость мониторинга радиоэкологической обстановки на различных природных и урбанизированных территориях является важной составляющей комплекса защитных мер, направленных на предотвращение возникновения различных последствий, которые могут негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека.

Краснодарский край можно условно поделить на 2 основные части: северную равнинную и южную горную. Обе части отличаются не только своим рельефом, но и преобладающим типом почв, разнообразными полезными ископаемыми, добываемыми на них, степенью заселенности, а также видами деятельности, обусловленными различными особенностями рельефа.

Пешеходная гамма-съемка проводилась в городе Краснодаре, городе Большой Сочи, городе Новороссийске, городе Анапе, городе Туапсе, станице Стародеревянской и в курорте Роза Хутор. Сбор данных гамма-фона производился дозиметром-радиометром ДКС-96.

Большинство значений МЭД на исследованных территориях находятся в диапазоне от 0,10 мкЗв/ч до 0,20 мкЗв/ч. В некоторых населенных пунктах значения МЭД гамма-излучения выходят за рамки этого диапазона. Данные МЭД по городам Анапе (0,11 мкЗв/ч), Туапсе (0,12 мкЗв/ч), Большой Сочи (0,11 мкЗв/ч), а также курорту Роза Хутор (0,11 мкЗв/ч) невысоки относительно остальных участков, что может быть объяснено тем, что эти населенные пункты расположены преимущественно в горной местности, что не предполагает возделывание пашен или строительство особо крупных промышленных предприятий.

В городах Новороссийске (0,17 мкЗв/ч), Краснодаре (0,14 мкЗв/ч), и станице Стародеревянской (0,14 мкЗв/ч), данные гамма-фона выше, так как Новороссийск является крупным центром цементной промышленности, а в Краснодаре сосредоточено большое количество заводов и предприятий. Вокруг ст. Стародеревянской расположено большое число сельскохозяйственных угодий, которые регулярно обрабатываются различными минеральными удобрениями, что несколько повышает количество радионуклидов в почвах.

В заключение можно добавить, что МЭД гамма-излучения не превышает допустимый гамма-фон установленный “Нормами радиационной безопасности”[1].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).

Список публикаций:

[1] СанПин 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г № 47 с 01 сентября 2009 г.

## Радиоэкологическая обстановка на территории г. Волгодонска Ростовской области

*Ревнивец Илья Сергеевич*

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.*

*[ahk063@gmail.com](mailto:ahk063@gmail.com)*

Город Волгодонск был основан в 1950 году. Расположен он на среднем юге части России на берегу Цимлянского водохранилища. Город находится в зоне с континентальным климатом. Город Волгодонск является городом-спутником Ростовской АЭС. В 30-км зоне наблюдения Ростовской АЭС расположены 22 пункта автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО). Пункты АСКРО предназначены для постоянного автоматизированного контроля радиационной обстановки в районах наблюдения. На территории самого Волгодонска расположены 3 пункта АСКРО. Так как Ростовская АЭС является непосредственным объектом, представляющим радиационную опасность, то имеет смысл проводить независимые исследования, связанные с влиянием АЭС на население города.

Целью работы являлась гамма-дозиметрия территории города Волгодонска с последующим определением и обсуждением полученных результатов. Гамма-дозиметрия производилась в жилых зонах города. Измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД) на обозначенных территориях проводились методом пешеходной гамма-съемки на высоте 1 метр над землей при помощи дозиметра-радиометра «ДРБП-03» с встроенным блоком детектирования «СБМ-20». Ниже, на *рис. 1* и в таблице представлены результаты статистической обработки данных МЭД по всему г. Волгодонску.

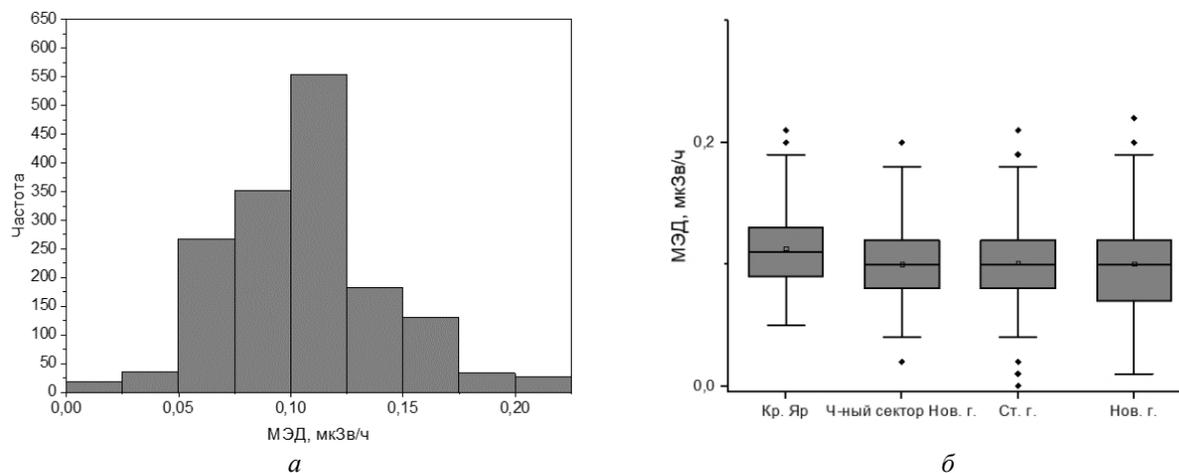


рис. 1. Распределение МЭД в г. Волгодонске: а) диаграмма распределения МЭД по городу; б) Распределение МЭД по жилым зонам

Параметр	МЭД, мкЗв/ч
Среднее	0,10
Минимальное	0,01
Максимальное	0,40
Мода	0,09
Медиана	0,10

Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в г. Волгодонске приближается к нормальному (рис. 1), средние и модальные значения (Таблица), не превышают гамма-фон, установленный Нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009 Российской Федерации (0,30 мкЗв/ч) [1]. В целом, полученные значения соответствуют вариациям, установленных в других регионах мира (0,10 – 0,20 мкЗв/ч) [2-4].

Для Ростовской области наблюдаются незначительные превышения (0,25 – 0,29 мкЗв/ч) средней МЭД, что объясняется геоморфологическими особенностями: повышенные значения приурочены, как правило, к овражно-балочным системам (повсеместно распространенным в Ростовской области), на дне которых происходит накопление почвенного  $^{222}\text{Rn}$ . Для г. Волгодонска повышенные МЭД могут быть также обусловлены излучением от зданий и сооружений, асфальтового покрытия, выбросами автотранспорта и предприятий топливной энергетики.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

- [1] СанПин 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г № 47 с 01 сентября 2009 г.
- [2] Vysokoostrovskaya, E.B., Krasnov, A.I., Smyslov, A.A., 1996. A map of natural gamma radiation doses in the Russian territory. Proc. Int. Conf. on Radioactivity and Radioactive Elements in the Human Environment (Tomsk, 22–24 May 1996). Tomsk. Politekh. Univ, Tomsk, 177 – 179.
- [3] Wang, W.X., Yang, Y.X., Wang, L.M., Liu, Q.C., Xia, Y.F., 2005. Studies on natural radioactivity of soil in Xiazhuang uranium ore field, Guangdong, China. Environ. Sci. 25, 120 – 123.
- [4] Song, G., Chen, D., Tang, Z., Zhang, Z., Xie, W., 2012. Natural radioactivity levels in topsoil from the Pearl River Delta Zone, Guangdong, China. J. Environ. Radioact. 103, 48 – 53.

## **Мониторинг радиационной обстановки в зоне наблюдения Ростовской АЭС**

**Сайфудинов Тимур Каноатишович**

*Бобылев Вячеслав Александрович*

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.*

*[tima.saufydionv2001@gmail.com](mailto:tima.saufydionv2001@gmail.com)*

Предприятия ядерного топливного цикла, включающие в себя АЭС, как и любой промышленный объект во время нормальной эксплуатации, генерирует различного рода выбросы [1]. К выбросам АЭС можно отнести газоаэрозоли и технические воды, содержащие техногенные радионуклиды. Попадая в почву, радионуклиды адсорбируются в ней и по пищевым цепочкам попадают в организм человека, что повышает ежегодную дозовую нагрузку.

Ростовская АЭС (РоАЭС) располагается на берегу Цимлянского водохранилища. В зоне наблюдения РоАЭС активно ведется сельскохозяйственная деятельность. При этом современные методы ведения сельского хозяйства, особенности климатических условий полусухих степей приводят к ветровой эрозии почв. Радионуклиды, осевшие на почву могут поступать в растения и по пищевым цепочкам в организм человека.

В работе представлены данные, полученные в радиоэкологических экспедициях начиная с 2000 года (предпусковой этап) по 2021 год на прилегающей к РоАЭС и г. Волгодонску территориях. Гамма-фон (мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч)) измеряли на ряде контрольных участков (КУ), заложенных в зоне наблюдения РоАЭС в рамках предпускового мониторинга. Гамма-фон измеряли дозиметрами-радиометрами ДРБП-03 и СПР-88н на высоте 100 см от поверхности почвы (грунта). Результаты статистической обработки данных по гамма-фону представлены на рис. 1 и рис. 2.

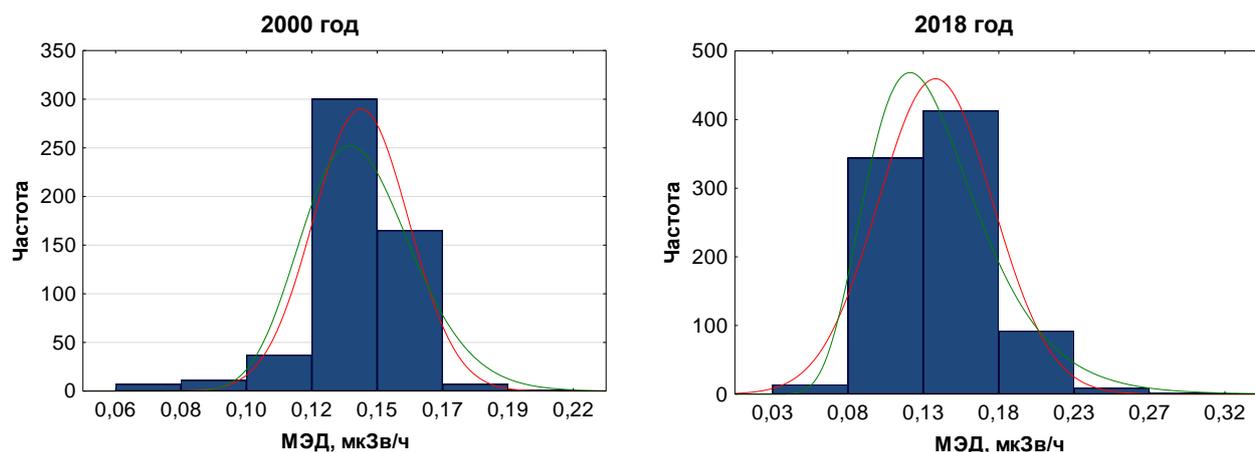


рис.1. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на высоте 100 см

Как правило, распределение гамма-фона на КУ зоны наблюдения Ростовской АЭС достаточно равномерное, при этом строго не подчиняется ни нормальному, ни логарифмически нормальному законам распределения. Также средние арифметические, средние геометрические, модальные и медианные значения МЭД в районе исследования варьируют в пределах неопределенности измерения (стандартного отклонения) и составляют 0,13–0,14 мкЗв/ч. Ниже, на рис. 2, представлены результаты длительных (20 лет) измерений МЭД на различной высоте от поверхности почвы в 30-километровой зоне наблюдения Ростовской АЭС.

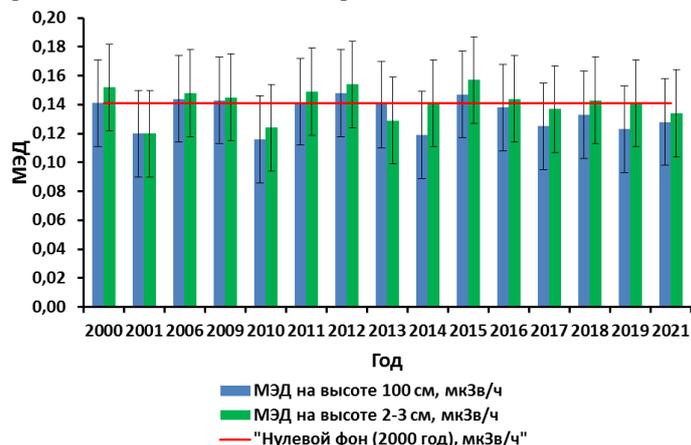


рис. 2. Изменение средней арифметической мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС

МЭД, измеренная в период мониторинговых исследований зоны наблюдения Ростовской АЭС, не превышает «нулевой фон» (рис. 2). При этом гамма-фон у поверхности почвы несколько выше, чем на высоте 100 см. Это обусловлено, как правило, тем, что поглощение (рассеяние) низкоэнергетического (с энергиями менее 100–150 кэВ) гамма-излучения от природных радионуклидов (например, от  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) на расстоянии 100 см от почвы выше. Дополнительным фактором может быть несколько большая запыленность надпочвенного слоя воздуха. Не стоит исключать и влияние гамма-излучающих продуктов распада радона и торона на гамма-фон в надпочвенном слое воздуха, особенно в засушливые периоды.

Основным результатов длительного мониторинга зоны наблюдения Ростовской АЭС является подтверждение отсутствия влияния работы АЭС на окружающую среду. Это подтверждается не только нашими исследованиями, но и измерениями на пунктах АСКРО, данными НПП Тайфун и сторонними исследованиями [2].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

- [1] Анализ результатов радиозоологического мониторинга в регионе размещения Ленинградской АЭС / В. К. Кузнецов, П.Н. Цыгвинцев, Н.И. Сан-жарова, А. В. Панов // *Радиация и риск.* – 2021. – Т. 30, № 2. – с. 89–100. doi: 10.21870/0131-3878-2021-30-2-89-100
- [2] Ежегодник «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году», Обнинск, 2021

## Радиационная обстановка на территории г. Тихорецка Краснодарского края

Сенин Илья Николаевич

Южный федеральный университет

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

[senjokusa@gmail.com](mailto:senjokusa@gmail.com)

Мониторинг гамма-фона проводится по всему миру, так как, радиационный фон оказывает влияние на состояние здоровья человека и на экологическую составляющую окружающей среды. В данной работе проводится исследование радиационной обстановки на территории города Тихорецка, Краснодарского края. Южная часть Российской Федерации является не только курортным регионом, но и аграрным, поэтому качество производимой продукции напрямую зависит от агрохимического состояния почвы.

Цель работы: исследовать радиационную обстановку в городе Тихорецке в Краснодарском крае.

Тихорецк располагается между такими крупными городами, как Краснодар и Ростов-на-Дону. Расстояние до Краснодара – 150 км, а до Ростова-на-Дону – 165 км. Площадь города составляет 46,02 км<sup>2</sup>. Водные ресурсы характеризуются реками Тихонькая и Челбас. В городе Тихорецке есть несколько промышленных предприятий, которые могут оказывать влияние на радиационный фон. В городе, также, имеется довольно важный железнодорожный узел, через который транспортируются тонны грузов каждый день.

Для оценки мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) использовали данные пешеходной гамма-съемки дозиметром-радиометром СРП-88н. Измерения были проведены на центральных улицах города, на частном секторе, в роще г. Тихорецка и в двух точках за пределами города (рис. 1, рис. 2 и таблица).

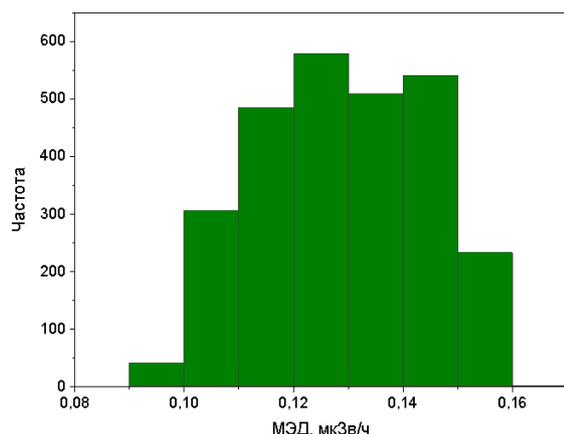


рис. 1. МЭД на территории г. Тихорецка

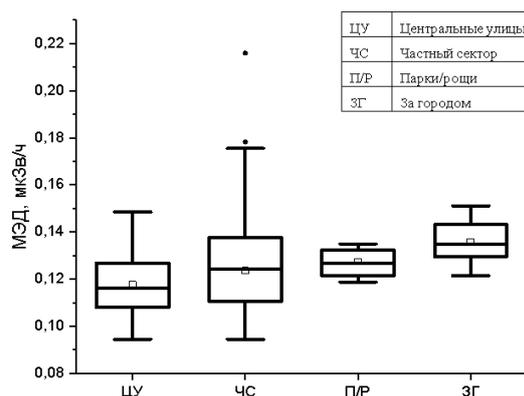


рис.2. Разброс значений МЭД на разных участках г.Тихорецка и за его пределами

Среднее арифметическое, модальное и медианное значения МЭД гамма-излучения в г. Тихорецке составляют 0,12; 0,13 и 0,12 мкЗв/ч соответственно при стандартном отклонении 0,02 мкЗв/ч. Полученные значения гамма-фона характерны для степных районов Краснодарского края и согласуются с Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

Параметр	Центральные улицы	Парки/рощи	За городом	Частный сектор
Среднее, мкЗв/ч	0,117	0,127	0,135	0,123
Стандартная ошибка, мкЗв/ч	0,0004	0,0005	0,0004	0,0005
Минимум, мкЗв/ч	0,094	0,118	0,121	0,094
Максимум, мкЗв/ч	0,148	0,135	0,1512	0,216
Количество измерений, шт	1040	148	441	1072

Значения гамма-фона за городом – самые высокие, это объясняется тем, что измерения были проведены вблизи промышленного предприятия и на полях, предназначенных для выращивания сельскохозяйственных культур, где используются минеральные удобрения, повышающие содержание радионуклидов в почвах (например, в селитре содержатся значительные количества <sup>40</sup>K).

Значения МЭД на частном секторе выше, чем на центральных улицах по следующим причинам:

1. Использовались разные материалы для постройки жилых помещений.
2. Разные системы отопления.

В дальнейшем планируется провести детальный сравнительный анализ гамма-фона в жилых зданиях и на открытых территориях с учетом строительных материалов, объемной активности радона в помещениях для расчетов годовых доз облучения населения от природных источников.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

- [1] Chernyago V.P. Current radiation environment in the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory / V.P. Chernyago, A.I. Nepomnyashchikh, V.I. Medvedev // *Russian Geology and Geophysics*. – 2012. – Vol. 53. – P. 926–935.
- [2] Бураева Е. А. и др. Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения природных и урбанизированных территорий Северного Кавказа // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – Т. 5. – №. 10.
- [3] Степаненко В. Ф. и др. Загрязнение радионуклидами территории Республики Дагестан вследствие Чернобыльской аварии и оценка доз облучения населения // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2011. – Т. 56. – №. 2. – С. 11-16.
- [4] ЖШ.289.386 ПС Прибор геологоразведочный сцинтилляционный СРП-88Н. Паспорт.
- [5] *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) / Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы // М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. — 100 с*

## **Анализ распределения естественных радионуклидов в антропогенно-преобразованных и нативных почвах Ростовской области**

**Сивцов Алишер Викторович**

*Козырев Денис Андреевич, Наливайченко Алина Алексеевна*

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н., Горбов Сергей Николаевич, д.б.н.*

*[Sivtsov1999@list.ru](mailto:Sivtsov1999@list.ru)*

В настоящее время вопросу естественной радиоактивности природных и селитебных зон уделяется особое внимание. Постоянный мониторинг необходимо проводить для выявления зон с повышенным уровнем содержания радионуклидов. В рамках города деградация почв протекает по различным сценариям, таким как загрязнение бытовым и строительным мусором, за счет автомобильных выхлопов и промышленных выбросов (тяжёлые металлы, нефтепродукты, бензапирен). Почвы городских территорий претерпели значительные изменения вследствие антропогенной деятельности. Как следствие, это приводит к изменению основных свойств городской среды, что в свою очередь, влияет на поведение и судьбу как естественных, так и искусственных радиоактивных изотопов химических элементов, а также влияет на радиоактивность окружающей среды в условиях города. Таким образом, оценка содержания радионуклидов в почве имеет особое значение для радиационной защиты населения.

Почвенный покров территории города (агломерации) представлен антропогенно-преобразованными почвами различной степени трансформации урбистратифицированными черноземами, а также более преобразованными урбостратоземами на черноземах или лесовидных суглинках, приурочены такие почвы к промышленной и селитебной частям городов. Собственно черноземы сохранились в парковых и рекреационных зонах, испытывая на себе влияние древесной растительности, черноземы с травянистой растительностью встречаются редкими островками в частном секторе.

На территории Ростовской области распространены и приходят в соприкосновение между собой две системы почвенных зон: чернозёмная и каштановая. Большая часть Ростовской области входит в чернозёмную зону, при этом зона расположения Ростовской АЭС и заповедника “Ростовский” попадает в зону сухих и полусухих степей с каштановыми почвами.

В данной работе анализировались почвы, отобранные в экспедициях 2012-2019 г. (Ростовская область). Пробоподготовка почв применялась стандартная: после взвешивания “мокрой” пробы почвы, её высушивали в сушильном шкафу при температуре 105-110 °С. Из всей пробы методом квартования отбирали необходимое количество почвы, взвешивали и переносили в специальный сосуд требуемого объёма (Маринелли 1 л, Маринелли 0,5 л и Чашка Петри). Полученный счётный образец герметично запаковывали, выдерживали его в течение двух недель до установления радиоактивного равновесия в ряду <sup>222</sup>Rn и проводили измерения удельной

активности радионуклидов с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра “Прогресс-Гамма” на основе кристалла йодистого натрия NaI(Tl).

Известно, что основной вклад в содержание радионуклидов в почвах исследуемых территорий вносит  $^{40}\text{K}$ . Как показали результаты работы, удельная активность  $^{40}\text{K}$  в почвах в среднем варьировались в пределах от 400 до 490 Бк/кг. При этом максимальная концентрация  $^{40}\text{K}$  была зафиксирована в чернозёмных почвах – 1537 Бк/кг. Удельная активность  $^{232}\text{Th}$  во всех исследуемых почвах Ростовской области изменялась в пределах от 26 до 30 Бк/кг. Максимальная удельная активность была зафиксирована также в чернозёмных почвах (112,4 Бк/кг), что в 1,5 раза больше, чем в каштановых почвах. Значимых отличий распределения  $^{232}\text{Th}$  в данных почвах выявлено не было. Содержание естественного радионуклида  $^{226}\text{Ra}$  в каштановых почвах Ростовской области в среднем варьируется в пределах 21–25 Бк/кг, а в чернозёмной почве в пределах от 21 до 23 Бк/кг. При этом максимальная концентрация данного элемента фиксировались в чернозёмной почве (93,6 Бк/кг). В целом активность  $^{226}\text{Ra}$  в различных почвах совпадает в пределах погрешности. Известно, что радий не входит в состав отдельных минералов, а широко распространен в виде включений во многих образованиях. Процессы миграции  $^{226}\text{Ra}$  в почвах, его поглощение и накопление растениями существенно зависят от путей поступления и прочности закрепления данного элемента в сложной многокомпонентной системе, какой и является почва.

Результаты статистического анализа радионуклидного состава почв показали, что по критерию Манна-Уитни неразличимыми можно считать лишь удельные активности  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  (0,05 и 0,43 соответственно в черноземных и каштановых почвенных зонах). Удельная активность естественного радионуклида  $^{40}\text{K}$  согласно сравнительному анализу, в почвах каштановой зоны выше, чем в черноземной (данные статистически различимы). Это может быть обусловлено более высокой засоленностью почв каштановой зоны и преобладанием в этих районах выпотного почвенного режима.

Землепользование в городах и урбанизированных районах отличается повышенной интенсивностью эксплуатации, в результате чего практически все почвы, расположенные в городской черте, в той или иной степени подвержены физической деградации, являющейся результатом различного рода избыточных технологических нагрузок. Благодаря нашему исследованию, можно сделать вывод, что особых различий в содержании радионуклидов между нативными и антропогенно-преобразованными почвами каштановой и чернозёмной зон территорий Ростовской области, на данный момент, нет.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

## **Радионуклиды в листовой подстилке широколиственных лесов (на примере горной Адыгеи)**

*Сидорина Ульяна Андреевна*

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.*

*[ulianasidorina72@gmail.com](mailto:ulianasidorina72@gmail.com)*

В рамках радиоэкологического мониторинга исследуются различные объекты окружающей среды. Лесная подстилка является одним из важных звеньев экосистемы, участвует в образовании гумуса [1]. Важно отметить, что лесная подстилка является неоднородной. Условно можно выделить 3 слоя опада: 1. Верхний слой состоит из веточек и листьев. Части растений легко различимы. 2. В среднем слое идет медленный процесс разложения. В слой входят измельченные остатки растений, которые еще смогли сохранить часть скелета. В этот слой часто растут грибы. 3. Самый нижний слой – слой гумификации. Он имеет бурый или черный цвет, обладает равномерной смешанностью, состоит из однородного вещества, которое значительно разложилось [2]. Анализ данных по содержанию искусственного  $^{137}\text{Cs}$  и естественных радионуклидов (ЕРН)  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , является одним из основных способов контроля радиационной обстановки отдельных участков местности, так как данные радионуклиды являются дозообразующими и на природных территориях, наряду с радоном и в отсутствие значимой загрязненности искусственным радиоцезием формируют гамма-фон на открытой территории.

Республика Адыгея – район, с большим разнообразием почв, пород, растительного покрова, объектов биофлоры, в том числе и с повышенным содержанием  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и искусственного  $^{137}\text{Cs}$ . В данной работе лесная подстилка отбиралась в лесных районах горной Адыгеи на различных контрольных участках с разными типами почв, такими как: ранкер лесной, бурые лесные почвы, луговые почвы и аллювиальные почвы (в поймах реки Белая и реки Сук).

В работе оценены особенности распределения естественных радионуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и искусственного  $^{137}\text{Cs}$  в лесной подстилке на территории Майкопского района, отобранных в экспедициях 2009–2021 годов. Удельную активность радионуклидов в образцах лесной подстилки определяли гамма-спектрометрическим методом на сцинтилляционном спектрометре «Прогресс-гамма». Методики отбора и подготовки проб использовались стандартные. Перед отбором проб измеряли мощность эквивалентной дозы гамма-излучения дозиметрами-радиометрами ДРБП-03 и СРП-88н.

Ниже, в таблице представлены результаты статистической обработки удельной активности перечисленных радионуклидов в лесной подстилке региона исследования.

	$^{137}\text{Cs}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Среднее, Бк/кг	9,0	10,0	10,3	214,3
Стандартная ошибка, Бк/кг	1,2	1,5	1,5	23,4
Медиана, Бк/кг	5,8	4,0	6,0	170,2
Мода, Бк/кг	0,0	0,0	0,0	0,0
СКО, Бк/кг	12,2	14,3	14,5	229,2
Дисперсия, Бк <sup>2</sup> /кг <sup>2</sup>	148,2	205,7	210,2	52553,6
Эксцесс	5,8	6,1	4,4	6,5
Асимметричность	2,3	2,2	2,1	2,1
Минимум, Бк/кг	0,2	2,0	1,8	31,0
Максимум, Бк/кг	62,7	78,9	68,5	1346,0
Количество измерений	96,0	96,0	96,0	96,0

В исследуемые периоды содержание  $^{137}\text{Cs}$  в лесной подстилке горных районов Республики Адыгея находилось в пределах 0,2–62,7 Бк/кг при среднем содержании 9,0 Бк/к. Содержание естественных радионуклидов варьируется в пределах 2,0–78,9; 1,8–68,5; 31,0–1346,0 Бк/кг для  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , в среднем 10,0; 10,3; 214,3 Бк/кг соответственно. Сравнительно высокое содержание искусственных радионуклидов объясняется наличием пород с высокой природной радиоактивностью, которые могут механическим путем загрязнять лесной опад. В основном лесная подстилка подвергается загрязнению  $^{137}\text{Cs}$  [2]. Отметим, что наибольшее содержание  $^{137}\text{Cs}$  в лесной подстилке наблюдается на участках со следующими типами почв: ранкер лесной и аллювиальные почвы.

На исследуемых участках с разным типом почвы наблюдаются различия в содержании как искусственного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , так и естественных  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ . Содержание радионуклидов в лесной подстилке зависят от расположения участка отбора в рельефе. В понижениях рельефа фиксируется высокое содержание  $^{137}\text{Cs}$ .  $^{40}\text{K}$ -подвижный элемент, фиксируется везде в значительных количествах. Загрязнение опада  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  скорее всего носит механический характер (частицами почв, обломками пород, пылью).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

- [1] Лесные подстилки как компонент лесного биогеоценоза //Т. М. Ильина, А. П. Сапожников//Почвоведение и растениеводство. Вестник КрасГАУ. -2007- , №5
- [2] J.-M. Bonzoma. Effects of radionuclide contamination on leaf litter decomposition in the Chernobyl exclusion zone/ J.-M. Bonzoma, S. Hättenschwiler, C. Lecomte-Pradines //Science of the Total Environment/ 562 (2016) 596-603.

## Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в г. Ростове-на-Дону

Шадин Антон Евгеньевич

Каменев Олег Валерьевич

Южный федеральный университет

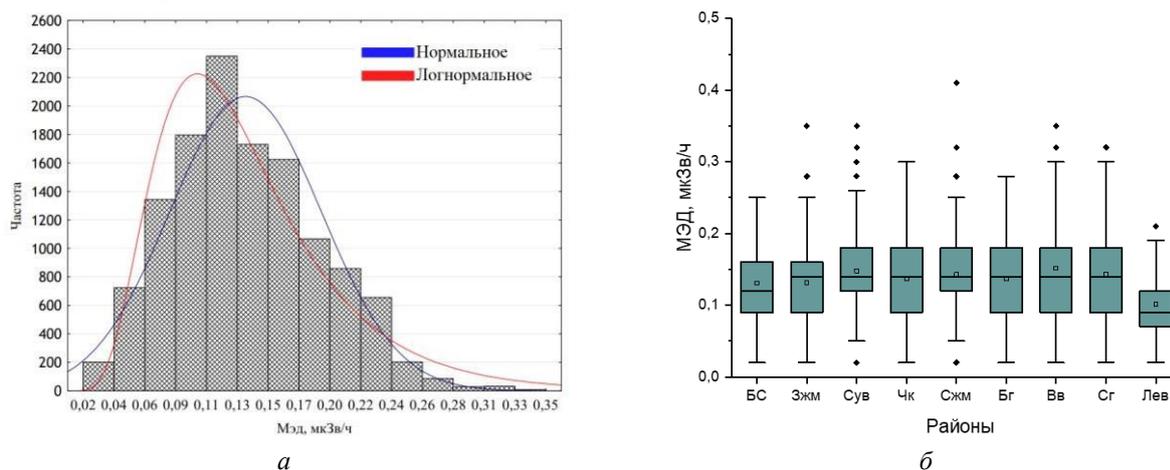
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

[antonshadin@yandex.ru](mailto:antonshadin@yandex.ru)

Человек подвергается воздействию гамма-излучения от природных и искусственных источников постоянно. Особую осторожность стоит проявлять жителям больших промышленных городов, так как они находятся в окружении большего числа таких источников. Мониторинг радиационной обстановки необходим для формирования мер защиты и снижения влияния гамма-излучения на население.

В данной работе представлены результаты оценки мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения в различных районах г. Ростова-на-Дону. Город Ростов-на-Дону является административным центром Южного федерального округа и Ростовской области. Он расположен на юго-востоке Восточно-Европейской равнины, на обоих берегах реки Дон в 46 км от места её впадения в Азовское море и в 380 км от Чёрного моря. Климат Ростова-на-Дону – умеренно континентальный, с мягкой зимой и жарким летом. По данным за 2020 год население города 1133307 человек. На территории города находятся такие крупные промышленные предприятия как ОАО «Алмаз», ООО "КЗ "Ростсельмаш", ОАО «Роствертол», ООО «Горизонт», завод «Прибор», ОАО «Завод „Квант“», Завод «Молот», «ЗАО «Агат»», ЗАО «Эмпилс», ФГУП РНИИРС и др. В п. Большие Салы находится подземное захоронение радиоактивных отходов ФГУП «РосРАО», в Волгодонском районе Ростовской области расположена Ростовская АЭС с четырьмя действующими энергоблоками.

Ниже, на *рис. 1* представлены результаты статистической обработки данных МЭД как во всем г. Ростове-на-Дону, так и в отдельных районах.



*рис. 1. Распределение МЭД в г. Ростове-на-Дону: а) диаграмме распределения МЭД по городу; б) Распределение МЭД в отдельных районах*

В г. Ростове-на-Дону наряду с официальным делением на 8 административных районов существуют и исторически устоявшиеся районы: Северный жилой массив (СЖМ), Западный жилой массив (ЗЖМ), микрорайон Чкаловский (ЧК), микрорайон Левенцовский (Лев), жилой комплекс Суворовский (СУ), жилой комплекс Болгастрой (БС), жилой комплекс Военвед (Вв), жилой комплекс Стройгородок (Сг). Исследования проводились в данных районах методом пешеходной гамма-съемки вдоль основных улиц. Использовали дозиметры-радиометры как ДКС-96 и ДРБП-03. Измерения МЭД проводились на высоте 1 м от поверхности земли.

МЭД гамма-излучения как по городу, так и отдельных районах находится в пределах 0,10-0,15 мкЗв/ч, что не превышает гамма-фон, регламентированный Нормами радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ-99/2009 – 0,3 мкЗв/ч). При этом, на отдельных территориях имеют место повышенные значения МЭД, достигающие или превышающие 0,3 мкЗв/ч. Это может быть обусловлено, как наличием отделки зданий, сооружений, памятников пешеходных переходов природными материалами (например, гранитами) с повышенным содержанием естественных дозообразующих радионуклидов, так и загруженностью улиц автомобильным транспортом (особенно, в часы пиковых нагрузок).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

# Радиационная обстановка населённых пунктов Ростовской области на примере села Алексеево-Лозовского Чертковского района

*Шаповалов Егор Сергеевич*

*Шульга Всеволод Владимирович, Дубров Никита Иванович*

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.*

*[vegor.shapovalov.01@mail.ru](mailto:vegor.shapovalov.01@mail.ru)*

Проблемы в области обеспечения радиационной безопасности человека и окружающей среды являются актуальными и социально значимыми. Это связано с работой атомных предприятий, радиационными авариями, захоронениями ядерных отходов, а также с естественным фоном, формирующимся за счёт содержания радионуклидов в почве, воде и воздухе. Эти факторы способствуют тому, что ежедневно, в каждой стране, проводится мониторинг гамма-фона, который необходим для предупреждения всевозможных негативных влияний радиационного облучения на человеческий организм и окружающую среду. Это и объясняет необходимость в контроле радиационной обстановки по всему миру [1-3].

Объектом исследований в данной работе является территория села Алексеево-Лозовского, расположенного в Чертковском районе Ростовской области. Оно располагается на севере Ростовской области и является границей между Воронежской и Ростовской областями. Село расположено на равнинной территории, почва черноземная, встречаются месторождения глины и щебня. Климат ближе к умеренно-континентальному, с холодной зимой и жарким сухим летом, с большим количеством солнечных дней. Среднемесячная температура в летний период колеблется от +20°C до +40°C, в зимний период от -25°C до +5°C. В селе отсутствуют предприятия, деятельность которых влияет на гамма-фон. Основная деятельность населённого пункта связана с обработкой земли. Функционирует несколько фермерских хозяйств, занимающихся выращиванием всевозможных зерновых культур. Население Алексеево-Лозовского составляет 3853 человека.

Работа посвящена оценке распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) методами пешеходной гамма-съёмки. Использовался дозиметр-радиометр СРП-88н. Измерения МЭД проводились по улицам данного населенного пункта на высоте 100 см от поверхности почвы.

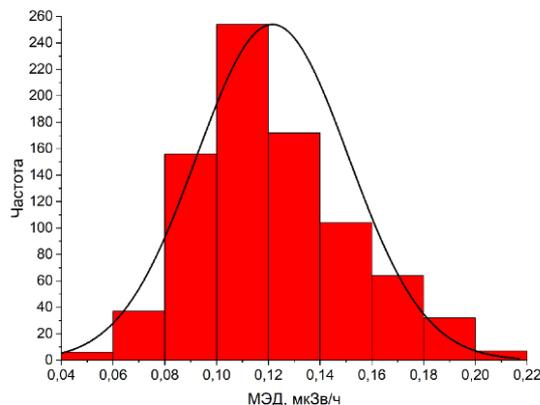


рис. 1. Распределение МЭД на территории села Алексеево-Лозовское

Минимум, мкЗв/ч	0,049
Максимум, мкЗв/ч	0,213
Среднее арифметическое, мкЗв/ч	0,122
Среднее геометрическое, мкЗв/ч	0,118
Мода, мкЗв/ч	0,105
Медиана, мкЗв/ч	0,116
Стандартная ошибка	0,001
Стандартное отклонение	0,029
Дисперсия выборки	0,001
Экцесс	0,069
Асимметричность	0,533
Количество измерений, шт	850

Проведённый статистический анализ полученных данных по распределению МЭД гамма-излучения на территории с. Алексеево-Лозовское (рис. 1 и таблица) показывает, что гамма-фон варьируется в пределах [0,049...0,213] мкЗв/ч, со средним значением 0,122 мкЗв/ч. Данные значения МЭД подчиняются нормальному распределению, это можно судить по близким значениям среднего, моды и медианы. Следовательно, радиационный фон однороден, аномалий не выявлено, а также гамма-фон не превышает Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 (0,3 мкЗв/ч) [4] и характерен для степных территорий Ростовской области [5].

В дальнейших исследованиях планируется детальное обследование различных населенных пунктов Чертковского района Ростовской области и оценка доз облучения населения от природных источников на открытой местности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).

Список публикаций:

- [1] Linnea E. *Environmental Radiation*. Wahl, Lawrence Berkeley National Laboratory/ Health Physics Society Specialists in Radiation Safety, 2010.
- [2] *Radiation in the Environment. Nuclear Science—A Guide to the Nuclear Science Wall Chart* ©2018 Contemporary Physics Education Project (СРЕР). Chapter 15.
- [3] Шершаков В.М., Булгаков В.Г., Крышев И.И., Вакуловский С.М., Каткова М.Н., Крышев А.И. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-Производственное Объединение «Тайфун»*, 2017.
- [4] СанПин 2.6.1.2523–09 *Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009)*. Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г. № 47 с 01 сентября 2009 г.
- [5] Бураева Е.А., Малышевский В.С., Нефедов В.С., Тимченко А.А., Горлачев И.А., Семин Л.В., Шиманская Е.И., Триболина А.Н., Кубрин С.П., Гуглев К.А., Толыгин И.Е., Мартыненко С.В. *Уровень эквивалентной дозы гамма-излучения природных и урбанизированных территорий северного Кавказа // Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10-5. – С. 1073-1077.

## Распределение удельной активности $^{137}\text{Cs}$ в почвах особо охраняемых природных территорий Ростовской области

Швецова Дарья Алексеевна

Маломыжова Наталья Викторовна, Джура Кирилл Олегович

Южный федеральный университет

Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.

[Dashik.shvet@yandex.ru](mailto:Dashik.shvet@yandex.ru)

Искусственные радиоизотопы со средним и длительным периодом полураспада в поверхностной среде Земли вызывают серьезную озабоченность при оценке радиационного риска для населения и окружающей среды.  $^{137}\text{Cs}$  считается одним из наиболее значимых радионуклидов продуктов ядерного деления. Он характеризуется большим выходом в реакциях деления и сроками жизни ( $T_{1/2} = 30,2$  года), высокой миграционной способностью и токсичностью. Его вертикальная миграция в почвах может быть вызвана фильтрационными токами воды, почвенной деятельностью животных и микроорганизмов, выносом из корнеобитаемого слоя растениями, сельскохозяйственной деятельностью человека и др. [1]. В данной работе была изучена динамика удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  по почвенному профилю в некоторых особо охраняемых природных территориях Ростовской области (Ботанический сад Южного федерального университета, Ростовский заповедник, Приазовская степь).

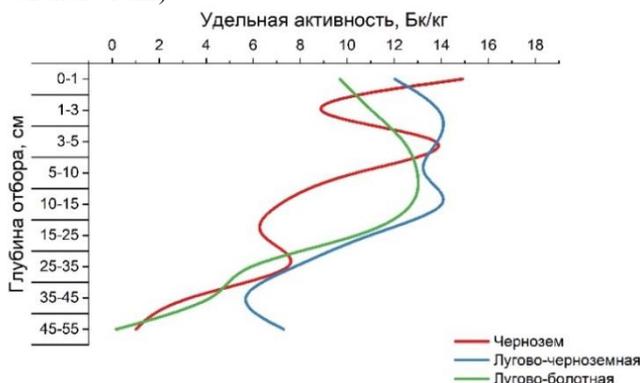


рис.1. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  по почвенному профилю в Ботаническом саду ЮФУ

Максимальная концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в черноземах Ботанического сада ЮФУ приходится на глубину 0–1 и 1–5 см, что объясняется повышенным содержанием гумуса в верхних слоях почвы, связывающим радионуклид в ходе сорбционных процессов. Лугово-болотные и лугово-черноземные почвы характеризуются хорошей водопроницаемостью и высокой водоудерживающей способностью. Поэтому в этих почвах профиль распределения  $^{137}\text{Cs}$  размытый, так как данный радионуклид хорошо растворяется в воде.

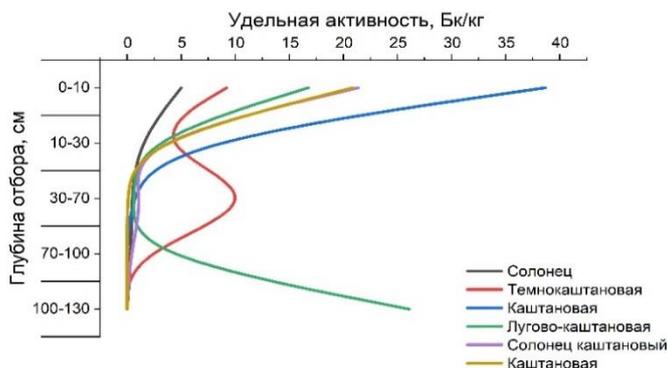


рис.2. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  по почвенному профилю в Ростовском заповеднике

В почвах Ростовского заповедника также присутствует общая тенденция к снижению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  от верхнего слоя почвы к нижнему, однако в темно-каштановых почвах наблюдается повышение концентрации радиоцезия в слое почвы 30–70 см, а в лугово-каштановой почве на глубине 100–130 см. Обычно каштановые почвы характеризуются повышенной плотностью, которая с глубиной только возрастает [2]. При долгих засухах почва может разрушаться, земля начинает сильно покрываться трещинами. Это приводит к их глубокому увлажнению и вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в нижележащие слои почвы.

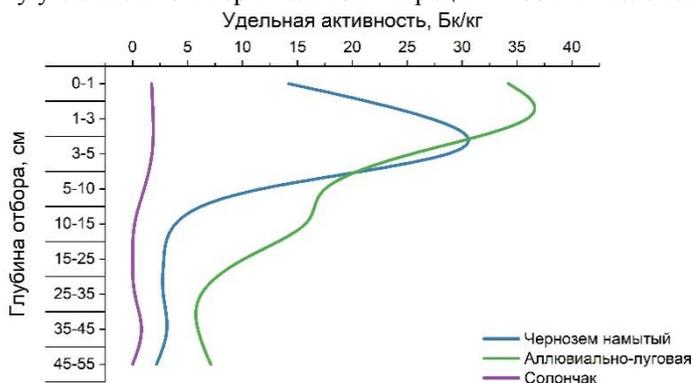


рис.3. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  по почвенному профилю в Приазовской степи

В намытых черноземных и аллювиально-луговых почвах Приазовской степи  $^{137}\text{Cs}$  накапливается в верхних слоях (0–5 см) и достаточно резко снижается с глубиной. Однако солончак, влажная органическая почва, демонстрирует другую картину: равномерное распределением  $^{137}\text{Cs}$  по почвенному профилю, концентрация радионуклида мала и варьирует в пределах 1–3 Бк/кг.

Таким образом,  $^{137}\text{Cs}$  в почвах особо охраняемых природных территорий Ростовской области характеризуется крайне низкими темпами вертикальной миграции, практически весь запас данного радионуклида сосредоточен в верхних пяти сантиметрах почвы, но во влажных почвах цезий может распределяться равномерно на большие глубины, так как искусственные радионуклиды чаще всего не входят в состав кристаллической решетки компонентов почвы, почв и донных отложений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

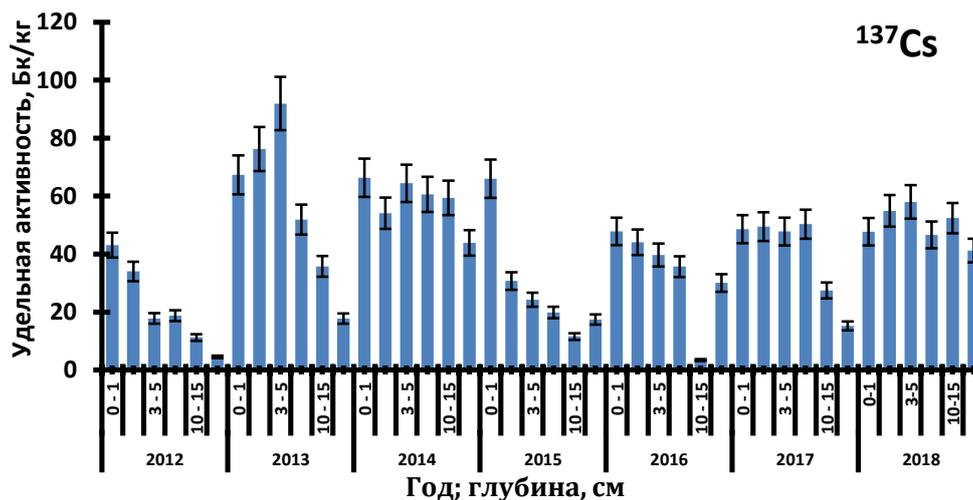
- [1] Василенко И. Я., Василенко О. И. // Радиоактивный цезий. Энергия: экономика, техника, экология. 2001. N 7. С. 16–22.  
 [2] Ташинова, А.А // Почвы природных экосистем Кумо-Манычской впадины. Вестник института комплексных исследований аридных территорий. 2011. Т. 2. № 2 (23). С. 34–38.

## Анализ содержания $^{137}\text{Cs}$ в различных типах почвы в горных районах Республики Адыгея

*Ширяева Анастасия Андреевна*  
Южный федеральный университет  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
[anastasia.shiryeva00@mail.ru](mailto:anastasia.shiryeva00@mail.ru)

В горных районах часто встречаются различные радиоактивные аномалии, связанные с месторождениями и добычей полезных ископаемых, а также выходами пород с высоким содержанием естественных радионуклидов. На территориях с сильно расчлененным рельефом развиты оползневые и обвальные процессы, приводящие к обнажению различных горных пород. Например, в Майкопском районе Республики Адыгея, из штолен происходит вынос поллютантов в объекты окружающей среды. Вокруг штолен фиксируется повышенный фон гамма-излучения (порядка 0,4 мкЗв/ч снаружи и до 1,8 мкЗв/ч внутри).

Работа посвящена анализу содержания искусственного  $^{137}\text{Cs}$  в различных типах почв горной Адыгеи. Модельной площадкой был выбран Майкопский район Республики Адыгеи со следующими типами почв: луговая, аллювиально-дерновая, бурая лесная, ранкер лесной. В работе использовались данные радиозоологических экспедиций с 2012 по 2018 годов. Удельную активность радионуклидов определяли гамма-спектрометрическим методом, используя сцинтилляционный спектрометр «Прогресс-гамма». Время набора спектра не превышало 24 часа. Погрешность измерений удельной активности радионуклидов не более 15%. Ниже, на рисунке приведен пример распределение удельной активности радионуклидов на участке ранкер лесной (РЛ). Точка РЛ расположена на дне ущелья и имеет тип почвы: ранкер лесной на элювии гранитов, среднесуглинистая. На *рис. 1* представлено изменение удельной активности искусственного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в профилях почвы в период с 2012 по 2018 годов на примере точки РЛ.



*рис. 1. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в профилях почвы в точке РЛ*

Как видно из *рис. 1* удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в точке РЛ достаточно высокая (до 100 Бк/кг). В большинстве почв района концентрация радиоцезия составляет 20–40 Бк/кг. Данная точка расположена на дне ущелья, где преобладает водная эрозия почв, поскольку  $^{137}\text{Cs}$  щелочной и легкорастворимый металл все его соединения водорастворимы, он легко мигрирует не по профилю, но еще и смывается по склону и переоткладывается на дне ущелья. В зависимости от климатических условий цезий накапливается в верхнем слое почвы, либо более равномерно распределяется по всему профилю.

В заключение необходимо отметить, что исследования особенности распределения радионуклидов в почвах территорий со сложным рельефом актуальны в области радиационной безопасности окружающей среды и позволяют решать задачи по особенностям миграции радионуклидов в наземных экосистемах.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

## Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения станиц Краснодарского края на примере станиц Староминской

**Шульга Всеволод Владимирович**

*Костырев Борис Павлович, Плахотняя Дарья Павловна, Рачейсков Никита Анатольевич, Шаповалов Егор Сергеевич*

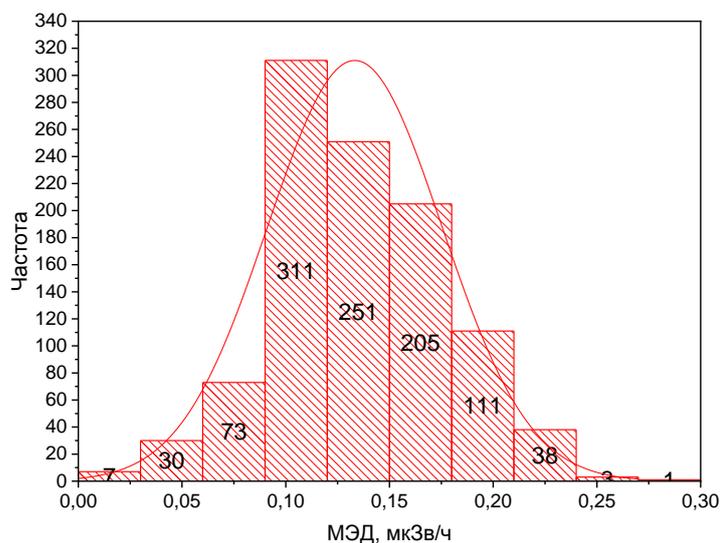
*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.*

*[ssevashulga@mail.ru](mailto:ssevashulga@mail.ru)*

Станица Староминская является крупным сельскохозяйственным поселением и расположена в степной зоне Краснодарского края. Территория данного населенного пункта отличается равнинно-холмистым типом рельефа. Климат умеренно-континентальный, с мягкой зимой и жарким сухим летом с большим количеством солнечных дней. Среднемесячная температура в зимний период колеблется от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+5^{\circ}\text{C}$ , в летний период от  $+15^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ . Предприятия, влияющие на радиационный фон, отсутствуют.

Работа посвящена изучению гамма-фона (мощности эквивалентной дозы гамма-излучения; МЭД, мкЗв/ч) на территории ст. Староминской. Были обследованы улицы: Щорса, Степная, Орджоникидзе, Калинина, Краснознаменная, Петренко, Александровская, Ленина, Мира. Измерения производились в организациях: МБУК «РДКС», МКУК «СДК Большевик», «СДК Кавказ», а также ряд частных домовладений. Измерения проводились дозиметрами-радиометрами ДКС-96 и СРП-88 на высоте 100 см от поверхности почвы (грунта). Особенности распределения МЭД в ст. Староминской приведены на *рис. 1* и в таблице.



*рис. 1. Распределение МЭД в ст. Староминской Краснодарского края*

Минимум, мкЗв/ч	0,020
Максимум, мкЗв/ч	0,280
Среднее арифметическое, мкЗв/ч	0,133
Мода, мкЗв/ч	0,070
Медиана, мкЗв/ч	0,129
Стандартная ошибка, мкЗв/ч	0,00131
Дисперсия выборки	0,0018
Экссесс	-0,149
Стандартное отклонение	0,042
Асимметричность	0,125
Количество измерений, шт	1030

Распределение МЭД гамма-излучения в ст. Староминская близко к нормальному, равномерное, однородное. Отсутствуют значимые выбросы в значениях гамма-фона. Среднее, медианное и модальное значения мощности эквивалентной дозы гамма-фона на данной территории не превышают Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) Российской Федерации ( $0,3 \text{ мкЗв/ч}$ ) [1]. Полученные в работе результаты согласуются с литературными данными [2].

Учитывая социальную напряженность среди населения, связанную с радиофобией, а также активно развивающиеся промышленность и сельское хозяйство в разных регионах России, подобные работы следует проводить на постоянной основе. Необходимо оценивать возможные изменения гамма-фона от природных источников как для оценки дозовых нагрузок, так и для выявления аномалий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032) / (БА30110/20-3-07ИФ).*

Список публикаций:

[1] СанПин 2.6.1.2523–09 Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009). Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г № 47 с 01 сентября 2009 г.

[2]. Бураева Е.А., Малышевский В.С., Нефедов В.С., Тимченко А.А., Горлачев И.А., Семин Л.В., Шиманская Е.И., Триболина А.Н., Кубрин С.П., Гуглев К.А., Толпыгин И.Е., Мартыненко С.В. *Уровень эквивалентной дозы гамма-излучения природных и урбанизированных территорий северного Кавказа // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-5. – С. 1073-1077.*



## 21 - Проблемы и методологии преподавания физики. История физики и техники

Воробьев Максим Олегович, учитель физики  
Тамбов, Школа №3 г. Котовска Тамбовской обл., Институт математики и фундаментальной информатики  
**Астрофотография**  
e-mail: [vorob--yov@mail.ru](mailto:vorob--yov@mail.ru) стр. 198

Габдрахманова Лилия Айратовна, доцент  
Уфа, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт  
**Самое время отказаться от болонской системы**  
e-mail: [la-gabdrahmanova@mail.ru](mailto:la-gabdrahmanova@mail.ru) стр. 199

Кузнецова Алина Александровна, 2 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Экологический потенциал школьного курса физики и межпредметная интеграция**  
Мастропас Зинаида Петровна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [kuznetsova.alina@bk.ru](mailto:kuznetsova.alina@bk.ru) стр. 200

Петрова Виктория Александровна, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Изучение физики природных процессов в старших классах с целью формирования физических аспектов естественнонаучной картины мира.**  
Петрова Галина Григорьевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [viktoria.boldyreva1502@yandex.ru](mailto:viktoria.boldyreva1502@yandex.ru) стр. 201

Рябенская Инна Валерьевна, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Физический  
**Пропедевтика непрерывного физического образования в основной школе**  
Мастропас Зинаида Петровна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [ryabenskaya\\_inna@mail.ru](mailto:ryabenskaya_inna@mail.ru) стр. 202

Яковлев Игорь Николаевич, 2 курс  
Томск, Томский государственный педагогический университет, Физико-математический  
**Исследовательская деятельность в рамках смешанного обучения физики**  
Румбешта Елена Анатольевна, д.п.н.  
e-mail: [yakovlevig97@yandex.ru](mailto:yakovlevig97@yandex.ru) стр. 203

**Астрофотография**  
**Воробьев Максим Олегович**  
*Средняя школа №3 с УИОП г. Котовска Тамбовской области*  
[vorob--yov@mail.ru](mailto:vorob--yov@mail.ru)

Существует много инновационных подходов к организации проектной и исследовательской деятельности обучающихся в современной школе [1]. Основная задача педагога – помочь обучающимся выбрать правильный вектор развития умений и навыков в той или иной естественно-научной или гуманитарной сфере. Проектная деятельность занимает в этом вопросе одну из лидирующих позиций т.к. позволяет ученикам коснуться самых разных направлений исследования и выбрать то, что наиболее интересно.

В этой статье будет рассмотрен пример одного из видов исследовательской деятельности в естественно научной сфере – астрофотография.

Многие школьники, обучающиеся в средней школе, имеют целый арсенал оборудования для исследований. Одним из таких примеров является фотоаппарат. Многим ребятам дарят такие дорогостоящие подарки на день рождения или за хорошую учебу в развлекательных целях. Но далеко не все знают, как фотоаппараты можно использовать в исследовательской деятельности такого бесконечно интересного объекта как звездное небо.

В статье будет рассмотрен положительный опыт исследований звездного неба как прекрасного способа повышения интереса к предмету физика в целом и к астрономии, в частности.

Фотоаппарат с хорошим увеличением позволяет рассмотреть на ночном небе то, что невозможно увидеть невооруженным глазом. Многие школьники, имея аппараты с такими техническими возможностями, в силу незнания лишают себя огромного удовольствия от наблюдения за объектами глубокого космоса. В связи с этим на базе школы были организованы элективные курсы по наблюдению звездного неба с использованием фотоаппарата «Астрофото», что нашло положительный отклик как среди заинтересованных школьников, имеющих фотоаппарат, так и среди ребят равнодушных к физике и астрономии.

Результатом работы над проектом в течении одного года была организована поездка в Крымскую астрофизическую обсерваторию на «Летние астроканикулы-2021» для всех желающих школьников. Где ребята улучшили свои навыки в фотографировании звездного неба, обработке фотографий, а также узнали много новых объектов глубокого космоса, которые, несомненно, заслуживают стать «моделями» для съемок.

Некоторые результаты обработанных астрофотографий приведены на рисунках (рис.1) (рис. 2).

Изображения получены путем наложения нескольких снимков друг на друга в программе удобной для обработки астрофотографий Sequator. Способ сложения фотографий весьма распространен среди астрофизических наблюдений, т.к. является одним из методов открытия астероидов и комет. [2]



рис. 1 Галактика Андромеда M31



рис. 2 Шаровое звездное скопление в созвездии Геркулеса M13

**Список публикаций:**

- [1]. Байбородова Л.В. Проектная деятельность школьников в разновозрастных группах: пособие для учителей общеобразовательных организаций // М.: Просвещение, 2013. – 175 с.
- [2]. Соколова М. Г., Сергиенко М. В. Астероиды, сближающиеся с Землей, как возможные родительские тела метеорных потоков // Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. 2016, Т. 158, кн. 4 с. 583 – 592.
- [3] Разумовский В.Г. Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике. Пособие для учителей. М., «Просвещение», 1975.

**Самое время отказаться от болонской системы**  
**Габдрахманова Лилия Айратовна, Закирьянов Фарит Кабирович**  
**Башкирский государственный университет**  
[la-gabdrahmanova@mail.ru](mailto:la-gabdrahmanova@mail.ru)

Успех выпускников физико-технического института (ФТИ) БашГУ до недавнего времени во многом был обусловлен высоким качеством преподавания, уровнем подготовки профессорско-преподавательского состава института. Методика преподавания физики в высшей школе была великолепно отработана в XX веке, накоплен огромный опыт преподавания, основное содержание курсов позволяло до недавнего времени формировать прочную базу физических знаний у студентов. Однако за последние 15-20 лет, после вступления России в Болонское соглашение и начала реформирования системы образования, стало очевидным, что для физического образования проведение этой реформы является не просто бесполезным, но и вредным. Унификация уровня подготовки со среднеевропейским на деле привела только к понижению уровня физического образования в РФ. Причём главным отрицательным последствием перехода к болонской системе для физиков является то, что бакалавры физики *не востребованы работодателями*. При относительно высоком уровне теоретической подготовки бакалавры фактически не приступали к решению практических задач, и не имеют необходимого практического опыта работы, который давался раньше на 5-м курсе в специалитете, а сейчас – в магистратуре. В то же время ограниченное количество бюджетных мест в магистратуре не способствует подготовке достаточного количества квалифицированных кадров ни для производства, ни для научно-исследовательской сферы.

Другой проблемой физического образования в ФТИ БашГУ является *отсутствие воспроизводства преподавательских кадров* в необходимом количестве. Произошло «вымывание» кадров наиболее продуктивного возраста 40-50 лет. Именно в этом возрастном слое должны формироваться кадры, которые возьмут на себя будущее физического образования и науки. Однако этот возрастной диапазон практически отсутствует – в ФТИ работают преимущественно «старики» старше 60 лет, либо магистранты и аспиранты до 30 лет. Конечно, связано это, прежде всего с тем, что зарплата в сфере образования несопоставима с той значимостью сферы образования для государства и теми усилиями, которые затрачивает профессорско-преподавательский состав в своей деятельности. Если не принять соответствующих мер, то через 10-15 лет некому будет учить студентов и делать науку.

Постоянно меняющиеся ФГОСы, не принося абсолютно ничего нового, делают из преподавательского корпуса контору по производству и воспроизводству никому не нужных бумаг. Профессора и доценты заняты ежегодным многократным переписыванием учебных программ, составлением бесчисленных отчётов, заполнением одних и тех же анкет. В силу своей деловой некомпетентности и управленческой безграмотности бюрократам свойственно запрашивать от подчинённых, делающих дело, уйму информации, которая не характеризует дело и потому не нужна для управления. Сбор и предоставление такого рода управленчески никчёмной информации *отвлекает преподавателей от учебной и научной работы* до такой степени, что дело не делается. Канцелярщина и бумагомарание уносят у людей силы, здоровье, жизнь, не оставляют времени на подготовку к занятиям, научные исследования, отдых.

По упорно внедряемому «эффективному контракту» *возрастают требования* к публикационной активности, что объясняется желанием «догнать и перегнать» всех и вся в рейтингах лучших университетов. Как это делать в свете последних событий – неясно. Появляются непродуманные требования к внедрению методов дистанционного образования. Окончание пандемии COVID-19 требует пересмотра этих требований. Специфика физического образования во многом не предусматривает иного вида обучения, кроме как непосредственного взаимодействия преподавателя и студента. В особенности это касается физического практикума, лабораторных работ в учебных лабораториях и компьютерных классах. В то же время, постоянно растёт и учебная нагрузка при фактически замороженной зарплате. Годовая учебная нагрузка составляет около 900 часов, причём основная часть приходится на аудиторские часы. Если добавить сюда внеаудиторную нагрузку и время для подготовки к занятиям, то получается, что большая часть рабочего времени преподавателя приходится на учебную работу.

В итоге имеем:

- не востребованность бакалавров физики работодателями
- старение преподавательских кадров, разрыв поколений
- много ненужной бумажной работы
- неэффективный «эффективный контракт»
- очень большая аудиторная нагрузка, приводящая к невозможности заниматься наукой

В свете происходящих в мире событий сейчас самое время отказаться от этой пагубной для отечественного образования и науки системы.

## Экологический потенциал школьного курса физики и межпредметная интеграция

*Кузнецова Алина Александровна*  
*Южный федеральный университет*  
*Маспронас Зинаида Петровна, к.ф.-м.н.*  
*[kuznetsova.alina@bk.ru](mailto:kuznetsova.alina@bk.ru)*

Одной из целей современного обучения в школе является получение не фрагментарных знаний по отдельным предметам естественно-научного цикла, а приобретение совокупности умений и представлений о мире под углом единства естественных наук, которые искусственно оказались разорваны в некоторых учебных планах и программах. Непосредственно это касается экологического воспитания обучающихся. Осуществлять работу по экологическому воспитанию детей в школе представляется возможным в рамках отдельных уроков физики, химии, биологии географии и т.п., но для обобщения и расширения представлений об окружающем мире считаю эффективным проведение интегрированного обучения. При таком виде деятельности возможно проведение физико-биологических или физико-химических школьных конференций, лекций, семинаров, лабораторных работ, различных игровых форм работ с рассмотрением экологических проблем, катастроф и предложением путей решения от обучающихся.

Для подготовки к проведению мероприятий экологической направленности в интернет-пространстве имеется достаточное количество интерактивных материалов. Для удобства использования его учителями-предметниками необходимо составление своеобразных комплектов таких мероприятий, ориентированных на разные возрастные группы школьников. Снабженные соответствующими методическими указаниями, такие комплекты могут одновременно использоваться учителями по разным предметам, как для интеграции, так и собственно по предмету. Мною был проанализирован школьный курс физики, были выделены темы, выносимые в программу интегрированных уроков, составлен перечень компетенций, которые будут сформированы у обучающихся в процессе такой работы. Также выделены уровневые индикаторы формирования данных компетенций, разработаны методические рекомендации по проведению интегрированных уроков.

Для формирования элементов экологической культуры и в целом осуществления экологического воспитания в рамках школьной программы дисциплин естественно-научного цикла предлагаю проведение уроков и мероприятий разных форм и содержания. Например, урок-конференция «Влияние вредных факторов на живые организмы», в котором интегрируемыми предметами будут являться химия, биология, физика и экология. Целью данного мероприятия является обобщение знаний по предметам и их применение для решения экологических проблем. На уроке класс делится на 3 команды, коллективно выясняется спектр проблем, которые, по мнению детей, важнее всего решить именно сейчас. После каждая команда предлагает свои пути решения в виде памятки.

Работу по экологическому воспитанию легко построить по типу проектной деятельности: например, можно предложить выполнить ученику или группе учеников проект под названием «Исследование парникового эффекта в домашних условиях» с целью представления его результатов на конференции (школьной, районной или более высокого уровня). Также можно провести свою собственную конференцию учителю физики совместно с учителем биологии и учителем химии «Радиоактивность и окружающая среда» с выступлением обучающихся с докладами по заранее заявленным темам, с включением блока свободного обсуждения по выдвинутым вопросам. В работе можно использовать и семинарское занятие «Диффузия и ее влияние на окружающую среду». Вопросы к семинару выдаются заранее, на уроке интегрируются физика и биология, целью является раскрыть понятие диффузии, найти ее проявление в природе, указать влияние на экологию. В том числе считаю эффективным внедрение технологии «веб-квест» для урока «Экология и двигатель внутреннего сгорания». В заданиях квеста затрагиваются вопросы влияния автотранспорта на экологическую обстановку, совершенствования двигателей с целью охраны природы.

Подготовка даже к стандартному уроку занимает у учителя осязаемое время, а организация и проведение интегрированных уроков или любых других интерактивных мероприятий явление не частое именно в силу необходимости длительной подготовки. Поэтому считаю, что если учителю будут доступны уже собранные комплекты тематических разработок по разным проблемам, то появится реальная возможность для вовлечения школьников в самостоятельную работу по добыванию знаний об окружающей действительности. И тогда, наверное, можно надеяться, что обучение по предметам естественно-научного цикла достигнет своей основной цели: сформировать у школьников правильное представление о мире окружающих его явлений и процессов.

Список публикаций:

[1] Мирзаева М.М., Гайдаев А.А., *Методика осуществления межпредметной интеграции физики с дисциплинами естественнонаучного цикла при обучении физике в школе - Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Психолого-педагогические науки*, 2017

[2] Заграничная Н.А., Паришутина Л.А., *Методы формирования естественнонаучной грамотности учащихся основной школы: интегративный подход - Школьные технологии*, 2017

## **Изучение физики природных процессов в старших классах с целью формирования физических аспектов естественнонаучной картины мира**

*Петрова Виктория Александровна*  
*Южный федеральный университет*  
*Петрова Галина Григорьевна*  
*[viktoria.boldyeva1502@yandex.ru](mailto:viktoria.boldyeva1502@yandex.ru)*

Физика – одна из наук, раскрывающая общие законы природы. Именно поэтому, как школьный предмет, она способствует развитию знаний обучающихся об окружающем мире. Знакомство с природными явлениями с точки зрения физики помогает учащимся в будущем с успехом решать ряд различных естественнонаучных и технических задач.

Одной из важных целей образования в школе является формирование естественнонаучной картины мира. Понимание устройства окружающего мира необходимо человеку для разумного природопользования и для разрешения современных экологических проблем. Кроме того, важно осознавать свою ответственность перед природой, обществом, будущими поколениями за результат своей деятельности [2]. Несформированность у обучающихся научной картины мира как единого целого, низкий уровень экологической грамотности не соответствует поставленным целям.

Прививая интерес учащихся к физике природных явлений, анализу процессов, повседневно происходящих в природе, можно развивать один из важных процессов познавательной деятельности школьников – мышление, а также выстраивать целостную картину окружающего мира, собрав многообразие житейских наблюдений и научных знаний в одно целое [1].

Изучение методической и научной литературы обнаруживает некоторые трудности работы учителя в данном направлении. Во-первых, это дефицит урочного времени. Во-вторых, - отсутствие в достаточном объёме информации о сложных вопросах современной физики, изложенной в доступной для старшеклассников форме.

Целью данного исследования является разработка для старшеклассников обучающего сопровождения к изучению физики природных процессов.

Необходимо отметить, что значительное внимание при использовании данного материала уделяется межпредметным связям, которые способствуют развитию интереса к знаниям, усиливают мыслительную деятельность школьника, формируют интегрированные естественнонаучные знания.

В данной работе предлагается разработка цикла лекций, адаптированных к восприятию учащимися старших классов и направленных на формирование осознанного понимания происхождения и развития следующих природных процессов:

- I. Физика «парникового эффекта» в атмосфере.
- II. Радиационные процессы в атмосфере.
- III. Гроза как природный источник ЭДС.
- IV. Электрические разряды в атмосфере.
- V. Ионизация атмосферы. Космические лучи.

При изучении этих тем образовательная деятельность обучающихся старших классов направлена на актуализацию и изучение следующих тем и вопросов школьного курса физики: атомная физика (постулаты Бора, процессы поглощения и излучения энергии атомом), электромагнитное излучение (спектр электромагнитных волн), тепловое излучение, электродинамика (источники тока в электрической цепи, закон Ома для замкнутой цепи), молекулярная физика (испарение, конденсация, насыщенный пар, влажность воздуха), электрический ток в различных средах (электрический ток в газах, несамостоятельный и самостоятельный разряды), элементарные частицы (классификация элементарных частиц), рентгеновское излучение.

Достижение намеченных целей при использовании в старших классах предлагаемого обучающего сопровождения к изучению физики природных процессов способствует:

Развитию умения правильно наблюдать за исследуемым объектом природы, давать чётко сформулированные объяснения рассмотренным явлениям.

Повторению и углубленному изучению некоторых разделов школьного курса физики.

Ознакомлению с некоторыми экологическими проблемами, возникающими при взаимодействии человека с природой, а также обсуждению путей их решения.

Рассмотрению и анализу связи между изученным ранее материалом и рассмотренными природными явлениями, что позволяет дать им правильное физическое объяснение.

На наш взгляд, предоставляемые методические разработки будут полезны как учителям средних общеобразовательных учреждений, так и преподавателям среднего профессионального образования, и преподавателям ВУЗов на младших курсах.

Список публикаций:

[1] Засобина Г.А., Майорова Н.С., *Формирование естественнонаучной картины мира учащихся как предмет исследования – Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова, том 17, 2011.*

[2] Колкова Н.В. *Исследование форсированности естественнонаучного мировоззрения как цели образовательного процесса в эпоху глобальных проблем - Вестник ТГПУ. 2000.*

## **Пропедевтика непрерывного физического образования в основной школе**

***Рябенская Инна Валерьевна***

*Южный федеральный университет*

*Мастерпас Зинаида Петровна, к.ф.-м.н.*

*ryabenskaya\_inna@mail.ru*

В системе общего среднего образования изучение такого предмета как «Физика» занимает одну из ведущих позиций, так как физическое образование формирует научное мировоззрение, знания основных методов изучения природы, знакомит обучающихся с фундаментальными научными теориями и закономерностями, формирует исследовательские умения и навыки.

В структуре содержания школьного физического образования первый базовый курс физики изучается в 7 классе. При этом начальные представления о явлениях окружающего мира школьники, конечно, получают еще в начальной школе (1-4 классы), изучая природоведческие курсы («Окружающий мир», «Природа», «Наша Земля» и т.п.). Однако, в последующие два года обучения (5-6 кл.) школьники практически не используют эти первичные представления о физических явлениях, то есть в полной мере не обеспечивается непрерывность и преемственность физического образования. По нашему мнению, это приводит к тому, что обучающиеся не успевают усвоить весь материал, подготовленный курсом физики основной школой, в полной мере, это отражается на уровне сформированности у обучающихся умений методологического характера и умений применять основы теоретических знаний для объяснения природных явлений.

ФГОС и закон «Об образовании» говорит нам о том, что физическое образование должно осуществляться непрерывно, однако часто мы видим слабую связь центров обучения физике, недостаточность разработанности теоретических оснований и практических рекомендаций для введения и реализации пропедевтики. Исходя из этого нами обоснована целесообразность введения пропедевтических элективных курсов по физике для 5-6 классов и разработана концепция пропедевтического обучения в системе непрерывного физического образования. Мы рассмотрели множество уже существующих пропедевтических курсов по физике и увидели, что эти разработки представляют собой упрощенную версию курса физики 7-9 класса, что не отвечает целям введения подобных курсов, поэтому было решено разработать концепцию пропедевтического элективного курса, который может быть использован для повышения качества обучения обучающихся основной школы для того, чтобы обеспечить непрерывность и преемственность в изучении учебного предмета «Физика». На данном этапе уже созданы методические рекомендации для проведения курса, также разработана технологическая карта для всего курса, приведены примеры детальных разработок проведения некоторых уроков. Методическое пособие «Занимательная физика» включает в себя:

- 1) образовательную программу элективного курса по физике для 5-6 классов, которая составлена в соответствии с требованиями ФГОС для соответствующего уровня образования;
- 2) описание и содержание учебных занятий пропедевтического характера;
- 3) методические рекомендации для проведения занятий элективного курса.

Методические разработки составлены с учетом психолого-возрастных особенностей детей младшего подросткового возраста, наполнены нестандартными формами проведения уроков, например, практикумами, путешествиями, играми, сказками, аукционами и т.п. для того, чтобы активизировать познавательный интерес к изучению физики в дальнейшем у обучающихся. Знакомство с физикой мы предлагаем детям начать с того, что их окружает, с природных явлений. Так, например, первый урок для детей 5 класса начинается с воспоминаний

о явлениях окружающего мира, с которыми школьники уже сталкивались в жизни. Проводится такой урок в режиме педагогической игры. Затем даются некоторые несложные объяснения этих явлений с точки зрения физики. Далее детям предлагается попробовать проверить услышанные объяснения, проводя самостоятельный эксперимент. Например, провести опыты по образованию дождя (имея в качестве оборудования обычную вату и воду). Далее учитель проводит демонстрацию водоворота в бутылке, упоминая, в каких случаях мы должны учесть негативные эффекты этого явления. Обязательным этапом урока является домашнее задание. Обучающимся предлагается провести несложный домашний эксперимент, а именно – наблюдать за стаканом с водой на протяжении нескольких дней, отмечая уровень воды ежедневно. Таким образом, дети заметят, что уровень воды понижается, то есть вода испаряется – а это ещё одно природное явление. Такое домашнее задание положительно влияет на процесс формирования познавательного интереса. Этот прием дает школьникам возможность изучать окружающий мир экспериментально самостоятельно.

В подобной форме можно детей знакомить с более сложными физическими явлениями. Например, во время урока-игры по механике «Стрельба по мишеням» обучающимся предлагается выстрелить из баллистического пистолета под разными углами к горизонту (30,45,60). Выстрелы под каждым углом проводятся несколько раз, при этом обучающиеся записывают данные о дальности полета и о примерной высоте, на которую поднялся шарик. Затем предлагается сделать качественные выводы о дальности полета (зависит от угла, под которым брошено тело к горизонту и будет максимальной, когда угол равен  $45^\circ$ , а для углов, дополняющих друг друга оказалась одинаковой), и высоте подъема снаряда (снаряд достигнет наивысшей точки при выстреле под углом 60). Далее предполагается, что учитель станет для детей неким фокусником и с первого или со второго раза попадет в мишень при выстреле из пистолета, при этом снаряд пролетит через кольцо, так как все нужные вычисления будут произведены заранее. Стоит сказать школьникам о том, что они тоже так смогут, но только тогда, когда изучат закономерности баллистического движения на количественном уровне. Таким образом, педагогическая игра проводится для того, чтобы продемонстрировать непрямые физические закономерности в игровой форме и донести информацию о том, что более подробно с данным явлением школьники познакомятся при изучении курса общей физики.

На данный момент мы работаем над комплектацией двухгодичного пропедевтического курса, а также продолжаем апробировать элементы разработанного курса в практике педагогической деятельности в 5-6 классах общеобразовательной школы, учителем которой я являюсь.

Список публикаций:

1. Степанова Г.Н. // *Раннее обучение физике. «Физика в школе»-№4, М.:Школьная пресса, 2007 г.*
2. Тьле Н.Н. // *Резонансный подход к построению обучения. «Физика в школе»- №4, М.:«Школьная пресса», 2007 г.*
3. Гуревич А.Е., Исаев Д.А., Понтак Л.С.// *Введение в естественнонаучные предметы. Естествознание. 5—6 классы, М.:Дрофа 2016 г.*

## **Исследовательская деятельность в рамках смешанного обучения физики**

**Яковлев Игорь Николаевич**

*Томский государственный педагогический университет*

*Румбешта Елена Анатольевна*

*[Yakovlevig97@yandex.ru](mailto:Yakovlevig97@yandex.ru)*

Современная школа готовит школьников к жизни в мире. Будущее учащегося крайне неопределенно, и мы не можем предугадать, какой будет глобальная обстановка даже через десять лет. Какие технологии будут открыты, как изменится рынок труда и экономика. Поэтому так важно и необходимо развивать у современных школьников компетенции, которые позволили бы им успешно адаптироваться к быстро изменяющемуся миру и достигнуть в этих непростых условиях своих личных целей.

Также можно отметить различные внешние факторы, которые влияют на образовательный процесс в целом. Например, всемирная пандемия, которая практически на несколько месяцев свела все образование в дистанционный формат или частично дистанционный.

Соответственно, встает вопрос: как реализовывать образовательные стандарты в такой ситуации? Как в таком случае осуществлять не только сам образовательный процесс, но работать в рамках проектной и исследовательской деятельности?

Смешанное обучение — это образовательный подход, совмещающий обучение с участием учителя (лицом-к-лицу) с онлайн-обучением и предполагающий элементы самостоятельного контроля учеником пути, времени, места и темпа обучения, а также интеграцию опыта обучения с учителем и онлайн». Таким образом, технологию смешанного обучения можно рассматривать как технологию синергетическую, которая позволяет

более эффективно использовать преимущества как очного, так и электронного обучения. Использование цифровых образовательных ресурсов — это неотъемлемая и важная составляющая смешанного обучения.

Исследовательской деятельностью с учениками на уроках физики начинаем заниматься еще в 7 классе. И здесь можно говорить об опыте, как групповых, так и индивидуальных исследовательских работ.

Вся работа состоит из нескольких этапов:

I этап — подготовительная работа. Для начала нужно организовать виртуальное обучающее пространство. Это может быть группа «В Контакте», комната в «Скайпе», в которой выкладываются материалы, ведется текущая работа, обсуждаются результаты. В зависимости от того, сколько учитель ведет групп или курирует индивидуальных исследований. [5]

II этап — основной. Это — постановка цели, гипотезы, планирование работы в различных виртуальных ресурсах. Если работа ведется в группе, то удобнее всего работать над целью и задачами, которые можно скачать с Google-диска. Планируются задачи, учитель выясняет: кто и что сделал, а также какие вопросы возникли у учеников. Далее собственно сопровождение исследования в процессе реализации. На этом этапе большая часть работы проводится в рамках школы и кабинета. Поскольку предмет физика - научный, то вся практическая составляющая проводится в классе: постановка эксперимента. Оформление результатов также лучше проводить в Google-документах. Работа может выполняться как в синхронном, так и в асинхронном режиме. [2]

III этап — заключительный. Это — рефлексия образовательных результатов. На этом этапе учитель обсуждает с обучающимися в группе: что удалось сделать, чего удалось добиться, куда двигаться дальше. Возможно, ребята захотят продолжить работу над этим проектом в следующем году. Для того чтобы понять, что получилось и что не получилось, проводится опрос.

Есть много других социальных сетей, кроме названных автором, и есть много других виртуальных ресурсов, при помощи которых можно выполнять исследовательские работы. Это выбор самого педагога и его учеников.

Смешанное обучение, как и любая другая инновационная технология, требует времени и дополнительных усилий со стороны учителя. В отличие от классно-урочной системы, где основное время затрачивается на формирование учебных навыков и установление дисциплины, при использовании смешанного обучения основной упор делается на формирование навыков самостоятельной работы, групповой работы, взаимопомощи и коммуникативных компетенций. При правильном и полноценном применении, смешанное обучение работает на формирование ценных качеств личности.

Список публикаций:

[1] Андреева, Н. В. Шаг школы в смешанное обучение / Н. В. Андреева, Л. В. Рождественская, Б. Б. Ярмахов. – Москва : «Национальная Открытая Школа», «#EdCrunch», «Рыбаков Фонд», 2016. – 280 с.

[2] Каргина, Е. М. Анализ понятия профилизации образовательной среды в современной методологии познания / Е. М. Каргина // Вестник Челябинского государственного педагогического университета. – 2011. – № 6 – С. 68–79.

[3] Концепция профильного обучения на старшей ступени общего образования (Министерство образования Российской Федерации и Российская академия образования) // Интеграция образования. – 2002. – № 2/3. – С. 9–21.

[4] Медведева, М. С. Формирование готовности будущего учителя к работе в условиях смешанного обучения : дис. ... канд. пед. наук: 13.00.01 / Медведева Марина Сергеевна. – Нижний Новгород, 2015. – 220 с.

[5] Могилёв, А. В. Смешанное обучение как составляющая технологии профилизации образовательного пространства / А. В. Могилёв, А. В. Силина // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. «Проблемы высшего образования». – 2006. – № 2. – С. 79–84.

## Алфавитный указатель

Аверкиев И. К. ....	13	Краснова И. А. ....	37	Ромазев П. Е. ....	58
Алибай Т. Т. ....	143	Кудояров Д. Ш. ....	88	Рудский Д. И. ....	134
Анофриев В. А. ....	119	Кузив И. В. ....	127	Рябенская И. В. ....	202
Астафьев П. А. ....	14	Кузнецова А. А. ....	200	Сабанова Л. А. ....	136
Ахметов Р. Р. ....	144	Кузьмин Е. В. ....	149	Сабанова Л. А. ....	135
Бабенко Алина. ....	121	Кузьмин Г. В. ....	46	Сабурова В. С. ....	76
Бабенко Алёна. ....	120	Лазарева А. Э. ....	151	Савина К. Г. ....	137
Бармин Н. М. ....	145	Лебедев М. С. ....	72	Сайфудинов Т. К. ....	183
Бобылев В. А. ....	171	Леонтьев В. С. ....	48	Самойлова М. А. ....	78
Вебер С. С. ....	122	Леонтьев В. С. ....	50	Саносян А. А. ....	28
Волков Д. В. ....	15	Лобекин В. Н. ....	51	Сафаргалиев Д. И. ....	29
Воробьев М. О. ....	198	Лобекин В. Н. ....	53	Сдобнова В. П. ....	158
Габдрахманова Л. А. ....	199	Лунев Н. А. ....	128	Семенова К. В. ....	59
Габышев Д. Н. ....	106	Луницкая Ю. А. ....	130	Сенин И. Н. ....	185
Галатова А. О. ....	124	Лысенко В. Ю. ....	90	Сивцов А. В. ....	186
Гаптрахманова В. А. ....	147	Макинян Н. В. ....	131	Сидорина У. А. ....	187
Глазунова Е. В. ....	16	Максимов Г. С. ....	21	Синюков С. А. ....	9
Грибакова Т. В. ....	164	Маломыжева Н. В. ....	180	Смирнова К. И. ....	84
Двойнишников С. В. ....	160	Матыцина А. Р. ....	101	Смовж Д. В. ....	138
Денисова А. О. ....	126	Меренцов А. И. ....	22	Соломенникова А. С. ....	30
Дергачева А. В. ....	172	Минакова Е. Н. ....	73	Сушко Е. С. ....	93
Деревяга Д. Е. ....	174	Митюшкин Е. О. ....	132	Сыроварова К. А. ....	60
Дмитриев В. О. ....	18	Михайлов М. А. ....	152	Терехин К. А. ....	79
Дубров Н. И. ....	175	Мойса М. О. ....	23	Тимофеев В. С. ....	31
Ерагер К. Р. ....	19	Мошиченко С. Д. ....	64	Тимошенко Г. Г. ....	103
Есин Е. С. ....	176	Мухамадеева В. В. ....	54	Трофимова Е. С. ....	66
Ефимова М. В. ....	98	Мухутдинова А. А. ....	109	Убович М. ....	80
Жидель К. М. ....	20	Недоедкова О. В. ....	133	Фазлетдинов С. У. ....	110
Жуковская А. А. ....	86	Некрасова Т. В. ....	154	Фахретдинова А. Л. ....	111
Зуев В. О. ....	161	Нестеров В. Ю. ....	155	Филиппов М. А. ....	61
Зуева Е. А. ....	41	Никулин А. А. ....	24	Хаметова Э. Ф. ....	32
Иванов С. В. ....	42	Орехова С. М. ....	56	Хатламаджиян Ю. Б. ....	166
Ивашева Е. Е. ....	44	Остальцова А. Д. ....	38	Хисамов А. А. ....	113
Ильин В. А. ....	107	Панова А. В. ....	156	Шадин А. Е. ....	189
Иришин А. Г. ....	69	Панова А. В. ....	74	Шаповалов Е. С. ....	190
Исламов Д. Р. ....	36	Петров Д. А. ....	57	Шахмаев Р. Р. ....	114
Исхакова В. Ш. ....	148	Петрова В. А. ....	201	Швецова Д. А. ....	191
Калашникова К. А. ....	178	Плахотная Д. П. ....	181	Ширяева А. А. ....	193
Ковальчук Т. Н. ....	165	Поздеев В. А. ....	76	Шульга В. В. ....	194
Козенко О. А. ....	179	Поляков С. В. ....	25	Шупова Е. В. ....	94
Козонов А. Ю. ....	45	Пронина Е. В. ....	91	Яковлев И. Н. ....	203
Колесник О. В. ....	87	Раев А. А. ....	27	Яникаева П. Э. ....	139
Константинова М. Г. ....	70	Ревнивцев И. С. ....	182		
Корытников А. А. ....	99				

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ ВНКСФ-26.2 И ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

Ответственный за выпуск: Арапов А.Г.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленных диапозитивов.

Подписано в печать 18 марта 2022 г.

Формат 60x84 1/8

Ую-изд.л. Тираж I том - 400 экз., II том - электронное издание.