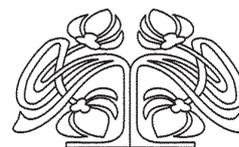




Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

ИЗВЕСТИЯ

САРАТОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
Новая серия



Научный журнал
2018 Том 18

ISSN 1817-3020 (Print)

ISSN 2542-193X (Online)

Издается с 2005 года

Серия Физика, выпуск 2

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

СОДЕРЖАНИЕ

Научный отдел

Радиофизика, электроника, акустика

Чуб Р. О., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д.

Способ передачи информации с использованием предсказательной модели в связанных системах с запаздыванием

84

Дудко Г. М., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Стальмахов А. В., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В.

Расчет фокусирующих преобразователей спиновых волн методом микромагнитного моделирования

92

Холуянова И. А., Богомолов С. А., Анищенко В. С.

Синхронизация химерных структур в ансамблях нелокально связанных кубических отображений

103

Оптика и спектроскопия. Лазерная физика

Кааби С. А. Д., Дроздов Н. А., Королик О. В.

Оптическое поглощение и комбинационное рассеяние света в легированных кристаллах $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$

112

Биофизика и медицинская физика

Ульянов С. С., Ульянова О. В., Зайцев С. С., Хижнякова М. А., Салтыков Ю. В., Филонова Н. Н., Субботина И. А., Ляпина А. М., Федорова В. А.

Исследование статистических характеристик оптических GB-спектров, формирующихся при рассеянии света на виртуальных структурах нуклеотидных последовательностей генов энтеробактерий

123

Методический отдел

Цой В. И. Представление термодинамических вероятностей с помощью полиномиальных форм (методические заметки)

138

Приложения

Из истории физики

Аникин В. М., Цой В. И. Исследования по физике лазеров на свободных электронах в Саратовском университете

144

Аникин В. М. «Ввести в действие до обнародования Правительствующим Сенатом» (К истории учреждения

физико-математического факультета Саратовского университета)

149

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (группы научных специальностей: 01.04.00 – физика)

Зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-56150 от 15 ноября 2013 года

Индекс издания в объединенном каталоге «Пресса России» 36015, раздел 30 «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Журнал выходит 4 раза в год

Директор издательства
Бучко Ирина Юрьевна

Редактор
Каргин Игорь Анатольевич

Художник
Соколов Дмитрий Валерьевич

Редактор-стилист
Кочкаева Инна Анатольевна

Верстка
Ковалева Наталья Владимировна

Технический редактор
Каргин Игорь Анатольевич

Корректор
Кочкаева Инна Анатольевна

Адрес учредителя, издателя и издательства:
410012, Саратов, ул. Астраханская, 83
Тел.: (845-2) 51-45-49, 52-26-89
E-mail: izvestiya@sgu.ru

Подписано в печать 26.05.2018.
Формат 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 9,43 (9,75).
Тираж 500 экз. Заказ 56-Т.

Отпечатано в типографии Саратовского университета.
Адрес типографии:
410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский университет, 2018



ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал публикует на русском и английском языках научные статьи по физике, содержащие новые результаты исследований, статьи учебно-методического характера, содержащие инновационную компоненту, статьи по методологии разделов физической науки, статьи, отражающие хронику научных мероприятий и важных событий в жизни физического сообщества. Материалы, ранее опубликованные или представленные для публикации в другие журналы, к рассмотрению не принимаются.

Рекомендуемый объем статьи – до 25 страниц текста, 5 рисунков и 4 таблицы. На русском языке статья содержит: УДК, заглавие, инициалы и фамилии авторов, название их места работы, электронный адрес авторов, аннотацию (200–250 слов), ключевые слова (не более 15), текст, благодарности и ссылки на гранты, список литературы.

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

Редколлегия рекомендует авторам структурировать текст, используя подзаголовки. Текст должен быть набран и напечатан через 1,5 интервала на бумаге формата А4 с полями 2,5 см, шрифт Times New Roman, размер шрифта основного текста – 14, второстепенного (аннотация, ключевые слова, сноски, таблицы, подписи к рисункам и надписи на них, приложения, список литературы, примечания) – 12; все страницы рукописи, таблицы, рисунки, следует пронумеровать. Иллюстрации и таблицы предоставляются дополнительно отдельным файлом. Рисунки должны быть в формате TIFF, JPG, CDR, BMP с разрешением не меньше 300 dpi. Нумерация источников в списке литературы должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте, ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Все рукописи, поступившие в редколлегию серии и соответствующие профилю журнала, проходят рецензирование, и затем редколлегия принимает решение о возможности их опубликования в журнале. В случае положительного решения об опубликовании статья подвергается научному и контрольному редактированию.

Автору статьи, принятой к публикации, одновременно с решением редколлегии высылается лицензионный договор. Плата за публикацию рукописей не взимается. Более подробно с правилами для авторов и порядком рецензирования можно ознакомиться на сайте журнала: <http://fizika.sgu.ru>.

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

Тел. / факс: +7(845-2) 51-14-30.

E-mail: fizika.sgu@bk.ru

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

CONTENTS

Scientific Part

Radiophysics, Electronics, Acoustics

- Chub R. O., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D.**
Method for Information Transmission Using a Predictive Model in Coupled Time-delay Systems 84

- Dudko G. M., Kozhevnikov A. V., Saharov V. K., Stalmahov A. V., Filimonov Yu. A., Khivintsev Yu. V.**
Calculation of Focusing Spin Wave Transducers Using the Method of Micromagnetic Simulation 92

- Kholuianova I. A., Bogomolov S. A., Anishchenko V. S.**
Synchronization of Chimera States in Ensembles of Nonlocally Coupled Cubic Maps 103

Optics and Spectroscopy. Laser Physics

- Kaabi S. A. D., Drozdov N. A., Korolek O. V.**
Optical Absorption and Raman Scattering in Doped Crystals TlGaSe_2 and TlInS_2 112

Biophysics and Medical Physics

- Ulyanov S. S., Ulianova O. V., Zaitsev S. S., Khizhnyakova M. A., Saltykov Yu. V., Filonova N. N., Subbotina I. A., Lyapina A. M., Feodorova V. A.**
Study of Statistical Characteristics of GB-speckles, Forming at Scattering of Light on Virtual Structures of Nucleotide Gene Sequences of Enterobacteria 123

Methodological Part

- Tsoy V. I.** Derivation of the Thermodynamic Probabilities Using Polynomial Forms 138

Appendices

From the History of Physics

- Anikin V. M., Tsoy V. I.** Physics of Free-electron Lasers in Saratov State University 144

- Anikin V. M.** «Enter into Action before Declaration by Governing Senate» (On the History of the Establishment of the Faculty of Physics and Mathematics at Saratov State University) 149



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

Главный редактор

Усанов Дмитрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Заместители главного редактора

Анищенко Вадим Семенович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Тучин Валерий Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Ответственный секретарь

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

Члены редакционной коллегии:

Аникин Валерий Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Бабков Лев Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Вадивасова Татьяна Евгеньевна, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Вениг Сергей Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Винницкий Сергей Ильич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Дубна, Россия)
Горохов Александр Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Самара, Россия)
Грибов Лев Александрович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
Давидович Михаил Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Дюбуа Арно, Ph.D, профессор Университета Париж-Сакле (Сент-Обен, Франция)
Кузнецов Сергей Петрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Малышев Сергей Александрович, доктор физ.-мат. наук (Минск, Беларусь)
Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Модельский Иосиф, Ph.D, профессор Варшавского Технологического университета (Варшава, Польша)
Нефёдов Игорь Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник Университета Аалто (Хельсинки, Финляндия)
Никитов Сергей Аполлонович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
Пирогов Юрий Андреевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)
Сербино Роберто, Ph.D, профессор Миланского университета (Милан, Италия)
Скрипаль Александр Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Сухоруков Глеб Борисович, профессор Университета Королевы Марии (Лондон, Великобритания)
Трубецков Дмитрий Иванович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)
Филимонов Юрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Хлебцов Николай Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Чигринов Владимир Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Гонг Конг, Китай)
Шараевский Юрий Павлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Шиманский-Гайер Лутц, Ph.D, профессор Гумбольдтского университета (Берлин, Германия)

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
«IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. NEW SERIES.
SERIES: PHYSICS»**

Editor-in-Chief – Dmitry A. Usanov (Saratov, Russia)

Deputy Editor-in-Chief – Vadim S. Anishchenko (Saratov, Russia)

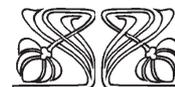
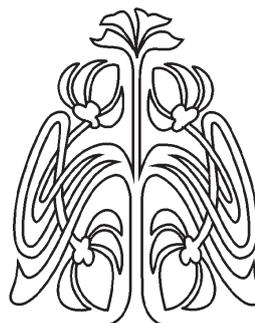
Valery V. Tuchin (Saratov, Russia)

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

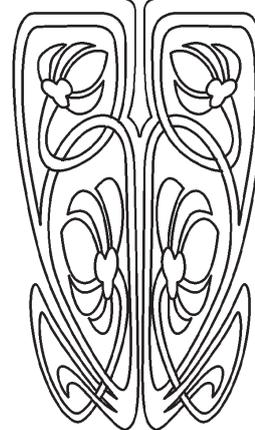
Members of the Editorial Board:

Valery M. Anikin (Saratov, Russia)
Lev M. Babkov (Saratov, Russia)
Roberto Cerbino (Milan, Italy)
Vladimir G. Chigrinov (Hong Kong, China)
Michael V. Davidovich (Saratov, Russia)
Arnaud Dubois (Saint-Aubin, France)
Yuri A. Filimonov (Saratov, Russia)
Alexander V. Gorokhov (Samara, Russia)
Lev A. Gribov (Moscow, Russia)
Nikolai G. Khlebtsov (Saratov, Russia)
Sergey P. Kuznetsov (Saratov, Russia)
Igor S. Nefedov (Helsinki, Finland)
Sergey A. Nikitov (Moscow, Russia)

Sergey A. Malyshev (Minsk, Belarus)
Leonid A. Melnikov (Saratov, Russia)
Joseph W. Modelski (Warsaw, Poland)
Yuri A. Pirogov (Moscow, Russia)
Yuri P. Sharaevsky (Saratov, Russia)
Lutz Shimansky-Geier (Berlin, Germany)
Alexander V. Skripal (Saratov, Russia)
Gleb B. Sukhorukov (London, UK)
Dmitry I. Trubetskov (Saratov, Russia)
Tatyana E. Vadivasova (Saratov, Russia)
Sergey I. Vinitzky (Dubna, Russia)
Sergey B. Venig (Saratov, Russia)

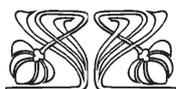
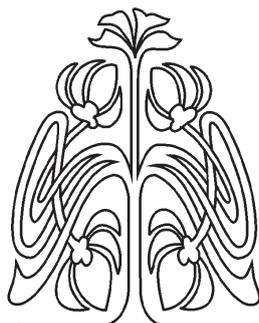


**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ**

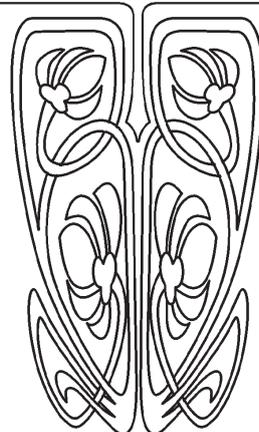




РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ В СВЯЗАННЫХ СИСТЕМАХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Р. О. Чуб, В. И. Пономаренко, М. Д. Прохоров

Чуб Роман Олегович, аспирант, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, chub.roman.olegovich@gmail.com

Пономаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; ведущий научный сотрудник, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, romarenkov@gmail.com

Прохоров Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, зав. лабораторией, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, mdprokhorov@yandex.ru

Объектом исследования является система скрытой передачи информации на базе генераторов с запаздыванием. Выбор модели обусловлен тем, что системы с запаздыванием достаточно просто реализовать в эксперименте, при этом они могут демонстрировать хаотическое поведение с большим числом положительных ляпуновских экспонент (гиперхаос). В передатчике использована модуляция времени задержки хаотического генератора бинарным информационным сигналом. В качестве приемника используется другая система с запаздыванием, в которой присутствует обобщенная синхронизация приемника и передатчика в случае, если передается логический 0 и отсутствует, если передается логическая 1. Одним из способов оценки наличия обобщенной синхронизации между передатчиком и приемником является метод вспомогательной системы. Однако он требует наличия двух идентичных систем с запаздыванием в приемнике. В данной работе для выделения скрытого информационного сигнала используется предсказательная модель сигнала передатчика по сигналу приемника. При удачном выборе параметров предсказательной модели ошибка предсказания мала в случае передачи логического 0 и велика в случае передачи логической 1. **Целью исследования** является подбор вида и параметров предсказательной модели для обеспечения уверенного приема информационного сигнала. **Использованы методы** численного моделирования систем с запаздыванием, проведена оценка скрытости предложенной системы передачи информации и ее устойчивости к шумам в канале связи. **В результате проведенных исследований** на основе численного моделирования построена предсказательная модель, подобраны параметры для системы скрытой передачи информации. Показаны преимущества предложенной системы связи перед другими системами передачи информации. Предложенный способ передачи информации имеет преимущество перед методом вспомогательной системы, поскольку не требует наличия двух идентичных систем в приемнике. **Ключевые слова:** системы с запаздыванием, обобщенная синхронизация, передача информации, предсказательная модель, численный эксперимент.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-84-91

© Чуб Р. О., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., 2018



Введение

Системы, демонстрирующие хаотическое поведение, активно используются для построения систем скрытой передачи информации с широкополосным спектром. При этом применяются различные способы передачи информации, основанные на эффекте хаотической синхронизации (это может быть полная хаотическая синхронизация [1], фазовая [2] или обобщенная синхронизация [3]). Кроме того, были предложены системы связи с использованием синхронного отклика [4], прямохаотические системы связи [5], системы передачи информации на системах с гиперболическим хаосом [6] и гиперхаотические системы [7].

Следует отметить, что в последнее время исследования в области хаотических систем передачи информации активизировались [8, 9]. Для построения эффективных и помехоустойчивых систем связи перспективным является использование систем с запаздыванием, которые отличаются весьма сложным поведением при относительно простом техническом устройстве.

Описание метода

Для передачи цифровой информации обычно используется модуляция одного или нескольких параметров передатчика. В [10] бинарный информационный сигнал изменяет время запаздывания в передатчике, что приводит к изменению его динамики. В качестве приемника используется другая система с запаздыванием, в которой присутствует обобщенная синхронизация приемника и передатчика в случае, если передается логический 0 и отсутствует, если передается логическая 1. Техническая проблема заключается в том, что для детектирования обобщенной синхронизации при помощи метода вспомогательной системы необходимо наличие двух одинаковых систем в приемнике.

При этом для корректной работы приемника важно распознать, с каким временем запаздывания в текущий момент времени работает генератор в передатчике. В данной работе предложен метод оценки изменения параметра, основанный на построении модели приемника по сигналу передатчика. Основная идея заключается в следующем. Будем использовать в приемнике систему с запаздыванием, на которую действует сигнал из канала связи. Мы можем построить предсказательную модель для временного ряда приемника, которая использует сигнал от пере-

датчика, приходящий из канала связи. Коэффициенты модели подберем таким образом, чтобы при передаче логического 0 (при одном времени запаздывания в передатчике) ошибка предсказания была малой, а при передаче логической 1 (при другом времени запаздывания в передатчике) ошибка резко увеличивалась. Наличие или отсутствие обобщенной синхронизации между передатчиком и приемником для передачи информации перестает быть важным, а ключевым свойством является ошибка предсказания модели приемника по сигналу передатчика.

Построение модели ведомой системы $y(t)$ по сигналу ведущей системы $x(t)$ было проведено для двух однонаправленно связанных систем первого порядка с запаздыванием, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x \dot{x}(t) &= -x(t) + \lambda_x - x^2(t - \tau_x), \\ \varepsilon_y \dot{y}(t) &= -y(t) + kx(t) + (1 - k)(\lambda_y - y^2(t - \tau_y)), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 10$ – параметр инерционности, $\tau_x = \tau_y = 100$ – время запаздывания ведущей и ведомой систем, $\lambda_x = 1.6$, $\lambda_y = 1.7$ – параметры нелинейности, k – коэффициент связи.

Радиофизическая блок-схема для такого типа связи может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

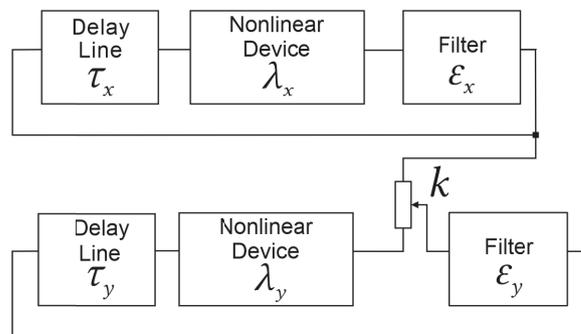


Рис. 1. Блок-схема связанных генераторов с запаздыванием
Fig. 1. Block-scheme of coupled oscillators with delay

Результаты исследования

Для численного исследования систем мы генерировали их временные ряды с единичным шагом интегрирования длиной 2×10^6 точек с различными начальными условиями, переходный процесс в 5×10^5 точек отбрасывали. Для предсказания временного ряда приемника при различных значениях коэффициента связи, выбираемых из интервала $k \in [0; 1]$ с шагом 0.01, строилась простейшая линейная модель следующего вида:



$$\hat{y}_{n+1} = a + a_0 x_n + a_1 x_{n-m}, \quad (2)$$

где n – дискретное время, m – временной лаг, который перебирался в диапазоне от 1 до 100; a, a_0 и a_1 – коэффициенты модели. Коэффициенты модели подгонялись методом наименьших квадратов. С использованием этой модели рассчитывалась среднеквадратичная ошибка аппроксимации, которая является суммой остатков модели:

$$\delta_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (3)$$

где N – количество точек, y_i – временной ряд ведомой системы, \hat{y}_i – значения, полученные при расчетах с оптимальной моделью. На рис. 2 представлена зависимость ошибки аппроксимации для оптимальной модели от коэффициента связи k .

Из рис. 2 видно, что при $k > 0.25$ ошибка предсказания модели сильно уменьшается, и для лага $m=10$ она минимальна. Это связано с тем, что при данных значениях параметров и достаточно больших коэффициентах связи ведомая система приближенно синхронизована с ведущей системой со сдвигом в 10 шагов интегрирования (рис. 3).

Используем эту особенность для передачи бинарной информации. Исследуем зависимость ошибки предсказания оптимальной линейной модели в зависимости от времени запаздывания в передатчике. Для этого зафиксируем коэффициент связи $k = 0.25$, при котором ошибка предсказания для $\tau_x = \tau_y = 100$ весьма мала, и для

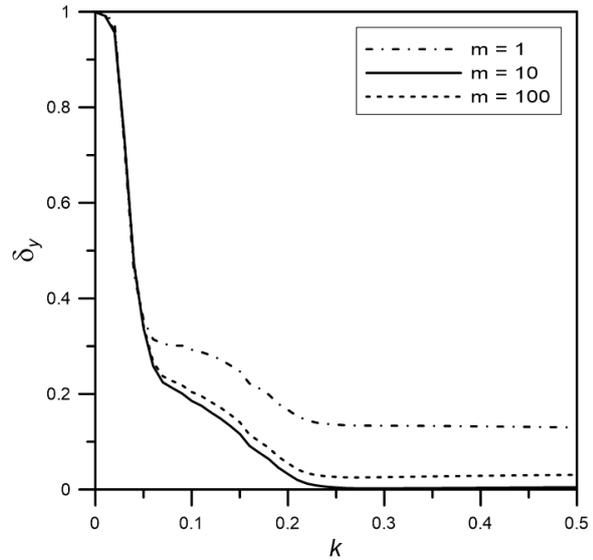


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичной ошибки аппроксимации d_y от коэффициента связи k при $\tau_x = \tau_y = 100$ для $m = 1, m = 10$ и $m = 100$

Fig. 2. Dependence of the root-mean-square error of approximation d_y on the coupling coefficient at $\tau_x = \tau_y = 100$ for $m = 1, m = 10$ and $m = 100$

модели (2) с оптимальными коэффициентами $a = -0.0024, a_0 = 0.1057, a_1 = 0.9342$ и лаге $m = 10$ будем изменять τ_x в ведущей системе в диапазоне $\tau_x [80, 160]$. Зависимость ошибки модели (2) от времени запаздывания τ_x представлена на рис. 4.

При одинаковых временах запаздывания в приемнике и передатчике линейная модель (2) дает малую ошибку предсказания, а при от-

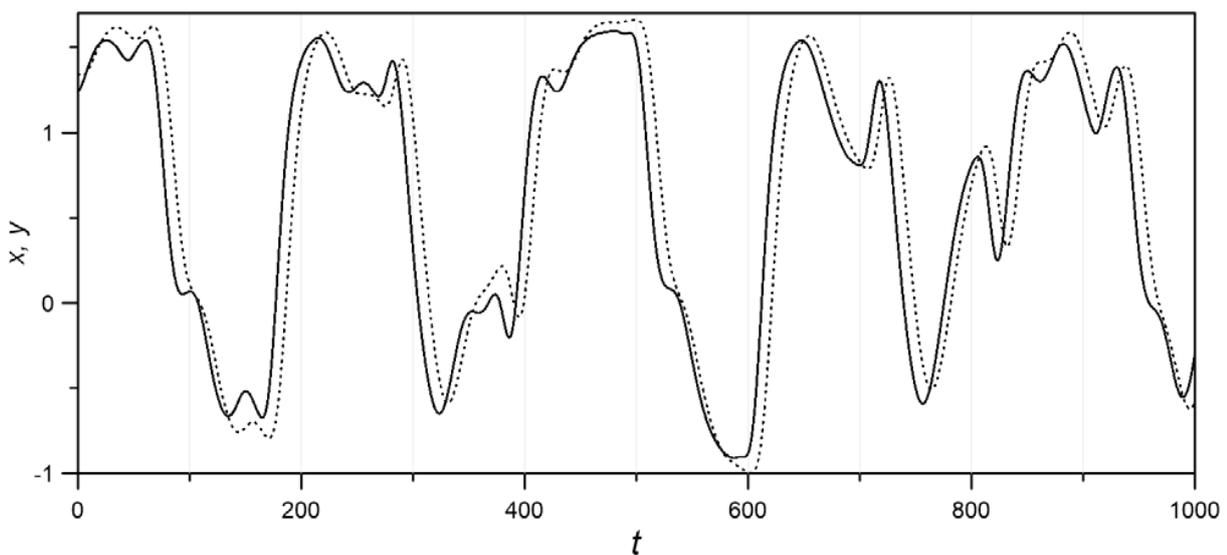


Рис. 3. Фрагмент временных рядов ведущей x (сплошная линия) и ведомой y (пунктирная линия) систем при $k = 0.25$

Fig. 3. Fragment of time series for the master system x (solid line) and slave system y (dashed line) at $k = 0.25$

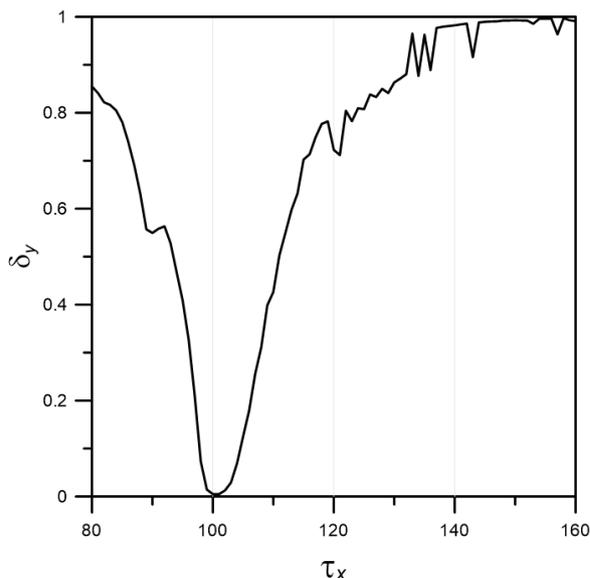


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной ошибки аппроксимации d_y от времени запаздывания в передатчике τ_x при $k = 0.25$

Рис. 4. Dependence of the root-mean-square error of approximation d_y on the delay time in the transmitter τ_x at $k = 0.25$

личающихся временах запаздывания – большую ошибку. Таким образом, построенную прогнозную модель (2) можно использовать для передачи бинарной информации.

Зафиксируем коэффициент связи между ведущей и ведомой системами $k=0.25$ и будем модулировать время запаздывания в ведущей системе по следующему закону: если передается логический 0, то время запаздывания в ведущей системе равно 100, и ошибка предсказания модели (2) при этом мала, а если передается логическая 1, то время запаздывания устанавливается

равным 120, при котором ошибка модели (2) резко увеличивается.

Работа предложенного метода проиллюстрирована нами на примере системы передачи информации следующего вида:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x \dot{x}(t) &= -x(t) + \lambda_x - x^2(t - (\tau + m(t)\tau_0)), \\ \varepsilon_y \dot{y}(t) &= -y(t) + kx(t) + (1 - k)(\lambda_y - y^2(t - \tau)), \end{aligned} \quad (4)$$

где $m(t)$ – бинарный информационный сигнал, $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 10$, $\tau = 100$ – время запаздывания, $\tau_0 = 20$ – модуляция времени запаздывания, $\lambda_x = 1.6$, $\lambda_y = 1.7$, $k = 0.25$.

При передаче информации генерировалась последовательность битов 0/1 случайным образом длиной 2×10^6 точек. Длина бита составляла 2000 точек. Общее количество переданных битов 1000. На рис. 5 черным цветом показан фрагмент передаваемого информационного сигнала длиной 10^5 точек, а серым цветом показана ошибка предсказания модели (2).

Для детектирования информационного сигнала среднеквадратичная ошибка предсказания усреднялась в скользящем окне по 2000 точкам. Фрагмент усредненного сигнала ошибки представлен на рис. 6 (серая линия).

Среднее значение сигнала ошибки составляет 0.37 при равной вероятности 0 и 1 в информационном сигнале. Логично выбрать это значение в качестве порогового и восстанавливать информационный сигнал по следующему правилу: если на длине бита более 50% значений сигнала ошибки оказывается меньше порога, то это логический 0, а если больше порога, то это логическая 1. Полученные результаты представлены на рис. 5, 6.

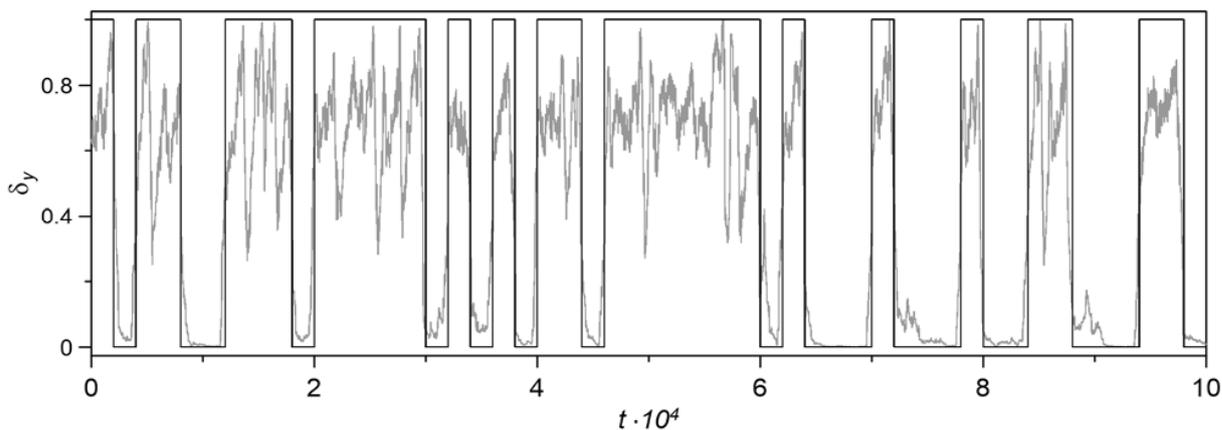


Рис. 5. Фрагмент информационного сигнала, представляющий собой последовательность битов 0/1 (черная линия), сигнал ошибки (серая линия)

Fig. 5. Fragment of the information signal representing a sequence of bits 0/1 (black line) and the error signal (gray line)

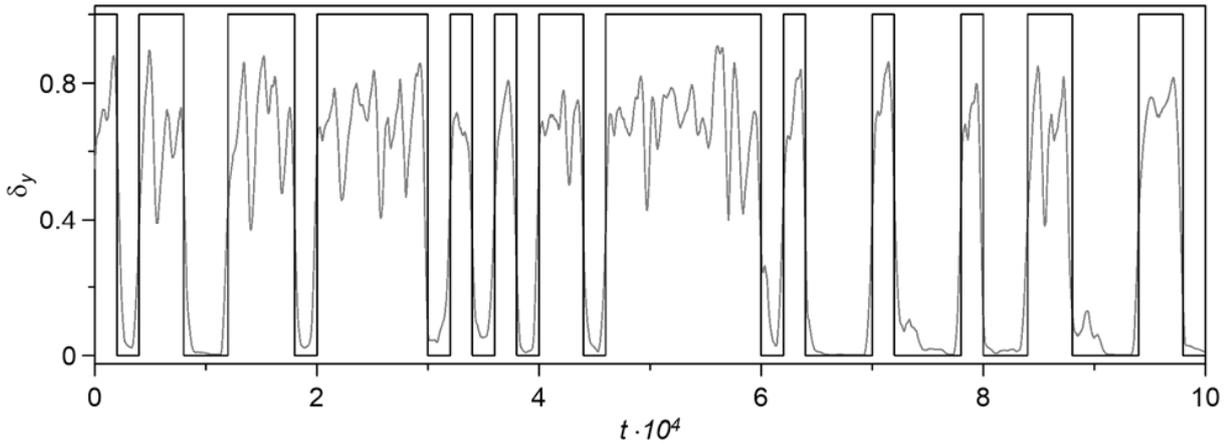


Рис. 6. Фрагмент усредненного сигнала ошибки предсказания модели (4) (серая линия) и восстановленный информационный сигнал (черная линия)

Fig. 6. Fragment of the averaged prediction error signal of the model (4) (gray line) and the reconstructed information signal (black line)

Достоверность передачи информации в цифровых системах связи характеризуется статистической величиной – вероятностью ошибки на бит (Bit Error Rate – BER). BER является вероятностью ошибочного приема при передаче одного бита информации, усредненной для статистически большого объема передаваемой информации. Из теории передачи аналоговых сигналов существует много параметров, которые используются для указания характеристики чувствительности радиоприемников, отношение сигнал/шум – S/N , определяемое как отношение средней мощности сигнала S к средней мощности шума N , является одним из основных и легко понимаемых. Поэтому широко применяется для различных радиоприемников, используемых в приложениях, начиная от радиоприема до фиксированной или подвижной радиосвязи. При измерении отношения сигнал/шум имеются две основные величины измерения. Одна – это уровень шума, а другая – уровень сигнала. Как результат способа, с помощью которого сделаны измерения, часто измерение полезного сигнала также включает в себя шум, т. е. это измерение сигнал + шум. Это, как правило, не является слишком большой проблемой, так как уровень сигнала, как и предполагалось, будет намного выше, чем уровень шума. В цифровой связи большое практическое значение имеет нормированная версия отношения сигнал/шум, E_b/N_0 . Энергия бита E_b – энергия, необходимая для передачи одного бита информации, равная произведению мощности передатчика S на длительность бита

T_b . N_0 – это спектральная плотность мощности шума, и её можно выразить как мощность шума N , деленную на ширину полосы W . Поскольку время передачи и скорость передачи битов R_b взаимно обратны, T_b можно заменить на $1/R_b$:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{ST_b}{N/W} = \frac{SR_b}{N/W} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R_b} \right). \quad (5)$$

Для исследования влияния шума на качество передачи информации мы добавляли в канал связи гауссовый шум с нулевым средним. На рис. 7 представлена зависимость BER от уровня шума в канале связи. Для сравнения

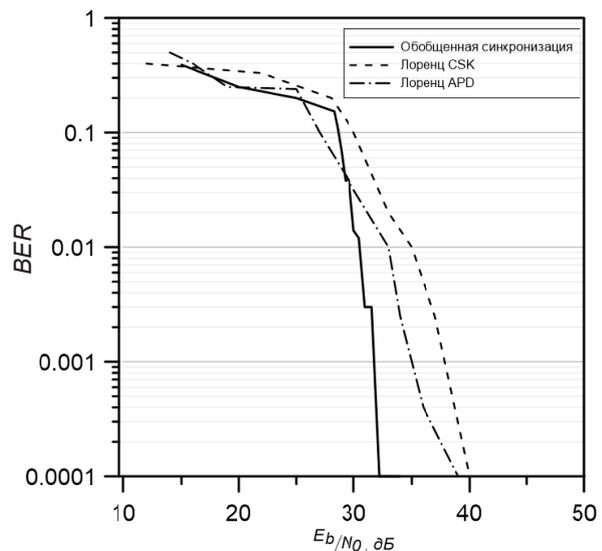


Рис. 7. Зависимость BER от уровня шума в канале связи
Fig. 7. Dependence of BER on the noise level in the communication channel



предложенной системы передачи информации с другими системами мы рассмотрели два метода передачи информации для системы Лоренца [11]: метод активно-пассивного разложения APD [12] (штрихпунктирная линия на рис. 7) и метод переключения хаотических режимов CSK [1] (штриховая линия на рис. 7).

Из сравнения приведенных результатов можно сделать вывод о том, что предложенный способ передачи информации является энер-

гетически эффективным, начиная с 30 дБ (см. рис. 7). Выигрыш составляет около 6 дБ.

Для проверки скрытости предложенной системы передачи информации мы провели численный эксперимент, в котором в качестве информационного сигнала использован меандр (последовательная передача 0, 1). Рис. 8 иллюстрирует спектры информационного сигнала (показан черным) и сигнала в канале связи (показан серым).

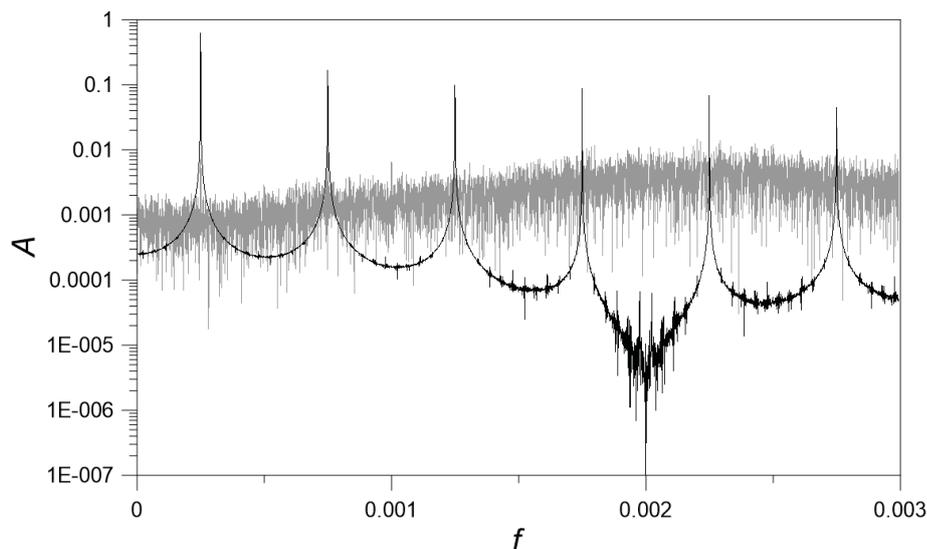


Рис. 8. Спектр информационного сигнала (черная линия) и сигнала в канале связи (серая линия)

Fig. 8. Spectra of the information signal (black line) and the signal in the communication channel (gray line)

По горизонтальной оси на рисунке отложена частота в условных единицах, по вертикальной оси – амплитуда в логарифмическом масштабе.

Из приведенного рисунка можно сделать вывод, что информационный сигнал невозможно выделить из сигнала в канале связи при помощи простой частотной фильтрации.

Заключение

Таким образом, в данной работе показана возможность построения системы скрытой передачи информации, основанной на построении модели приемника по сигналу передатчика. Этот способ позволяет обойтись без использования вспомогательной системы в приемнике. Построена и оптимизирована линейная прогностическая модель, позволяющая выделить информационный сигнал из хаотической несущей. На примере двух систем с запаздыванием

исследована устойчивость системы передачи информации к шумам в канале связи. Предложенный способ передачи информации имеет преимущество перед методом вспомогательной системы, поскольку не требует наличия двух идентичных систем в приемнике. Следует отметить, что выбор времени задержки в качестве управляющего параметра также не является единственным. Однако модуляция параметра нелинейности или параметра инерционности может привести к амплитудной модуляции сигнала в канале связи, что, в свою очередь, приведет к тому, что сторонний наблюдатель сможет выделить передаваемое сообщение при помощи простого амплитудного детектора.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00205).



Список литературы

1. Cuomo K. M., Oppenheim A. V., Strogatz S. H. Synchronization of Lorenz-based Chaotic Circuits with Applications to Communications // IEEE Trans. Circuits Syst. II : Analog Digital Signal Process. 1993. Vol. 40, № 10. P. 626–633.
2. Chen J. Y., Wong K. W., Cheng L. M. A secure communication scheme based on the phase synchronization of chaotic systems // Chaos. 2003. Vol. 13. P. 508–514.
3. Короновский А. А., Москаленко О. И., Попов П. В., Храмов А. Е. Способ скрытой передачи информации, основанный на явлении обобщенной синхронизации // Изв. РАН. Сер. физическая. 2008. Т. 72, № 1. С. 143–147.
4. Волковский А. Р., Рувльков Н. Ф. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 3. С. 71–75.
5. Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Панас А. И., Старков С. О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысококачастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2. С. 224–233.
6. Isaeva O. B., Jalnina A. Yu., Kuznetsov S. P. Chaotic Communication with Robust Hyperbolic Transmitter and Receiver. URL: <https://arxiv.org/abs/1708.02871> (дата обращения: 07.08.2017).
7. Filali R. L., Benrejeb M., Borne P. On observer-based secure communication design using discrete-time hyperchaotic systems // Commun. Nonlinear Sci. and Numerical Simulations. 2014. Vol. 19. P. 1424–1432.
8. Kocamaz U. E., Cicek S., Uyaroglu Y. Secure Communication with Chaos and Electronic Circuit Design Using Passivity-Based Synchronization // Journal of Circuits, Systems, and Computers. 2018. Vol. 27, № 4. 1850057.
9. Ren H.P., Bai C., Kong Q., Baptista M. S., Grebogi C. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication // Physica A. 2017. Vol. 478. P. 77–92.
10. Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kulminskiy D. D., Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization // Nonlinear Dynamics. 2017. Vol. 87, № 3. P. 2039–2050.
11. Williams C. Chaotic communications over radio channels // IEEE Trans. Circuits Syst. I : Fundamental theory and applications. 2001. Vol. 48, № 12. P. 1394–1404.
12. Parlitz U., Kocarev L., Stojanovski T., Preckel H. Encoding messages using chaotic synchronization // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 53, № 5. P. 4351–4361.

Образец для цитирования:

Чуб Р. О., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д. Способ передачи информации с использованием предсказательной модели в связанных системах с запаздыванием // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 84–91. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-84-91.

Method for Information Transmission Using a Predictive Model in Coupled Time-delay Systems

R. O. Chub, V. I. Ponomarenko, M. D. Prokhorov

Roman O. Chub, ORCID 0000-0002-5154-6834, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38, Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia, chub.roman.olegovich@gmail.com

Vladimir I. Ponomarenko, ORCID 0000-0002-1579-6465, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38, Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia, ponomarenkovi@gmail.com

Mikhail D. Prokhorov, ORCID 0000-0003-4069-9410, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38, Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia, mdprokhorov@yandex.ru

Background and Objectives: The object of our study is a system for secure information transmission based on time-delay generators. The choice of the model is justified by the fact that time-delay systems can be easily realized in experiment and they can exhibit chaotic behavior with a large number of positive Lyapunov exponents (hyperchaos). A transmitter uses the modulation of the delay time of a chaotic genera-

tor by a binary information signal. As a receiver, another time-delayed system is used, in which a generalized synchronization between the receiver and transmitter is present in the case of logical 0 transmission, and is absent in the case of logical 1 transmission. **Materials and Methods:** The auxiliary system approach is used to demonstrate that generalized synchronization is established between the transmitter and receiver. However, it requires the presence of two identical systems in the receiver. In this paper, a predictive model of the transmitter signal is used to extract a hidden information signal from the signal of the receiver. With a successful choice of parameters of the predictive model, the prediction error is small in the case of logical 0 transmission and is large in the case of logical 1 transmission. **Results:** The aim of our study is the selection of parameters for the predictive model to ensure a reliable extraction of the information signal. The predictive model is constructed and the parameters of the secure information transmission system are chosen. The advantages of the proposed communication system over the other information transmission systems are shown. The proposed method of information transmission has an advantage over the auxiliary system method, since it does not require the presence of two identical systems in the receiver.

Key words: time-delay systems, generalized synchronization, information transmission, predictive model, numerical experiment.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Researches (project no. 18-07-00205).



References

1. Cuomo K. M., Oppenheim A. V., Strogatz S. H. Synchronization of Lorenz-based Chaotic Circuits with Applications to Communications. *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Analog Digital Signal Process*, 1993, vol. 40, no. 10, pp. 626–633.
2. Chen J. Y., Wong K. W., Cheng L. M. A secure communication scheme based on the phase synchronization of chaotic systems. *Chaos*, 2003, vol. 13, pp. 508–514.
3. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Popov P. V., Hramov A. E. Method of hidden information transmission, based on the phenomenon of generalized synchronization. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2008, vol. 72, iss. 1, pp. 143–147 (in Russian).
4. Volkovsky A. R., Rulkov N. F. Sinhronnyiy haoticheskiy otклик nelineynoy sistemyi peredachi informatsii s haoticheskoy nesuschey [Synchronous chaotic response of the nonlinear system of information transfer by the chaotic carrier]. *Technical Physics Letters* [Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki], 1993, vol. 19, iss. 3, pp. 71–75 (in Russian).
5. Dmitriev A. S., Kjarginsky B. E., Panas A. I., Starikov S. O. Plain Scheme of Chaotic-Carrier Data Communications at Microwave Frequencies. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2001, vol. 46, no. 2, pp. 224–233.
6. Isaeva O. B., Jalnina A. Yu., Kuznetsov S. P. *Chaotic Communication with Robust Hyperbolic Transmitter and Receiver*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1708.02871> (accessed 07 August 2017).
7. Filali R. L., Benrejeb M., Borne P. On observer-based secure communication design using discrete-time hyperchaotic systems. *Commun. Nonlinear Sci. and Numerical Simulations*, 2014, vol. 19, pp. 1424–1432.
8. Kocamaz U. E., Cicek S., Uyaroglu Y. Secure Communication with Chaos and Electronic Circuit Design Using Passivity-Based Synchronization. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 2018, vol. 27, no. 4, 1850057.
9. Ren H.P., Bai C., Kong Q., Baptista M.S., Grebogi C. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication. *Physica A*, 2017, vol. 478, pp. 77–92.
10. Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kulminskiy D. D., Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Hramov A. E. Resistant to noise chaotic communication scheme exploiting the regime of generalized synchronization. *Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 87, no. 3, pp. 2039–2050.
11. Williams C. Chaotic communications over radio channels. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental theory and applications*, 2001, vol. 48, no. 12, pp. 1394–1440.
12. Parlitz U., Kocarev L., Stojanovski T., Preckel H. Encoding messages using chaotic synchronization. *Phys. Rev. E*, 1996, vol. 53, no. 5, pp. 4351–4361.

Cite this article as:

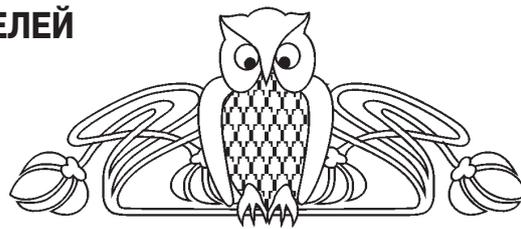
Chub R. O., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Method for Information Transmission Using a Predictive Model in Coupled Time-delay Systems. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 84–91 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-84-91.



УДК 537.622.2:537.862

РАСЧЕТ ФОКУСИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СПИНОВЫХ ВОЛН МЕТОДОМ МИКРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г. М. Дудко, А. В. Кожевников, В. К. Сахаров,
А. В. Стальмахов, Ю. А. Филимонов, Ю. В. Хивинцев



Дудко Галина Михайловна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, dugal_2010@hotmail.com

Кожевников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, kzhavl@gmail.com

Сахаров Валентин Константинович, научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, valentin@sakharov.info

Стальмахов Андрей Всеволодович, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, stalmahov@sgu.ru

Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН; заведующий кафедрой технологии материалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, yuri.a.filimonov@gmail.com

Хивинцев Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН; доцент кафедры технологии материалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, khivintsev@gmail.com

Объектом исследования данной работы являются спиновые волны (СВ) в магнитных пленках. В последнее десятилетие наблюдается всплеск интереса к СВ, который вызван перспективой создания спин-волновых устройств обработки информации субмикронных размеров и интеграции магнитных и спинтронных устройств. Следует добавить, что помимо традиционного применения спиновых волн для обработки СВЧ-сигналов широко обсуждается возможность изготовления логических устройств и голографической памяти на основе эффектов распространения и интерференции СВ. Целью этой работы является разработка нового метода для расчета фокусирующих преобразователей СВ, распространяющихся в тонкопленочных волноводах со значительно неравномерным распределением параметров. Метод

основан на использовании микромагнитного моделирования процесса распространения спиновых волн при их возбуждении точечным источником. Микромагнитное моделирование проводилось с использованием бесплатного программного обеспечения – «Object Oriented Micromagnetic Framework» (OOMMF), разработанного Национальным институтом стандартов и технологий США. Показана возможность расчета формы преобразователей, отвечающих оптимальной фокусировке спиновых волн, как для пленок с однородным распределением магнитных параметров, так и с неоднородным. В последнем случае численный подход является единственно возможным.

Ключевые слова: спиновые волны, волновые пучки, фокусирующие преобразователи, микромагнитное моделирование, неоднородные магнитные пленки.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102

Введение

Исследования в области разработки электронной элементной базы СВЧ информационных систем на основе магнитных колебаний и волн ведутся с 60-х годов прошлого века. Наблюдающийся на протяжении последнего десятилетия всплеск интереса к спиновым волнам (СВ) обусловлен перспективами использования в качестве носителей информации спиновых волн субмикронного и нанометрового масштаба, что открывает путь к созданию устройств на принципах магноники и существенной миниатюризации устройств на спиновых волнах. Кроме того, эффекты генерации спиновых волн спин-поляризованным током в ферромагнитных наноструктурах позволяют надеяться на интеграцию устройств магноники и спинтроники [1]. К этому следует добавить, что помимо традиционной области применения спиновых волн, связанной с обработкой информации на СВЧ, в последнее время широко обсуждается возможность создания логики и голографической памяти на эффектах распространения и интерференции спиновых волн [2, 3], а также нелинейных устройств различного типа, использующих спиновые волны [4, 5].

Важно отметить, что интерес к активным исследованиям спиновых волн субмикронного и нанометрового масштаба обусловлен успешным решением ряда задач, направленных на



изучение СВЧ свойств магнитных наноструктур. Во-первых, был достигнут значительный прогресс в технологии создания магнитных материалов и наноструктур с параметрами скорости релаксации спиновых волн на СВЧ, обеспечивающими длину пробега в десятки или даже сотни микрон [6, 7]. Во-вторых, были разработаны методы возбуждения спиновых волн с длиной волны от десятков микрон до сотен нанометров [8, 9], а также методы изучения пространственного распределения спиновых волн в микро- и наноструктурах, основанные на мандельштамм-бриллюэновской [10] и керровской [11] сканирующей спектроскопии. Наконец, появились численные методы микромагнитного моделирования [12, 13], которые позволяют изучать динамику спиновых волн в магнитных наноструктурах с неоднородным распределением параметров и при этом дают хорошее соответствие с результатами экспериментов.

В целом за последние годы был достигнут существенный прогресс в изучении свойств СВ в магнитных микро- и наноструктурах, характеризующихся существенно неоднородным основным состоянием, и выявлен целый ряд особенностей по сравнению со случаем дипольных магнито-статических волн (МСВ), распространяющихся в однородных пленочных волноводах. Однако вопросам формирования волновых пучков СВ в магнитных микроструктурах внимания практически не уделялось. Нам известно лишь несколько работ, где затрагивались вопросы формирования волновых фронтов от магнитных неоднородностей микронных размеров при возбуждении однородной СВЧ накачкой [14] или при рассеянии на них дипольных МСВ [15]. Между тем, ранее [16–19] на примере дипольных МСВ, распространяющихся в однородных пленочных волноводах, было показано, что возможность формировать волновые пучки и управлять их параметрами может существенно изменить подходы к построению устройств функциональной СВЧ электроники. Поэтому возникла необходимость в разработке основанного на методе микромагнитного моделирования подхода к расчету фокусирующих преобразователей СВ в тонкопленочных волноводах с существенно неоднородным распределением параметров.

Результаты и их обсуждение

Отметим, что в случае, когда имеется аналитическое выражение для закона дисперсии СВ $D(\omega, k, \varphi) = 0$, задающее связь между частотой ω , волновым числом k и углом φ между направле-

нием магнитного поля \vec{H} и волновым вектором \vec{k} , для расчета фокусирующих антенн можно использовать развитый ранее подход [16–19]. В этом случае решение обратной задачи по поиску формы фокусирующего преобразователя сводится к решению системы из трех уравнений, где помимо уравнения $D=0$ используется уравнение для угла θ между направлением групповой скорости СВ и полем \vec{H} (оно может быть получено из уравнения $D(\omega, k, \varphi) = 0$) и условие постоянства набега фазы вдоль траектории $L_i(\theta)$ ($L_i \cdot k = \text{const}$), которая соединяет точку фокуса и i -й участок криволинейного преобразователя. Применимость данного подхода в большинстве случаев ограничивается случаем однородных пленочных волноводов и приближением дипольных волн. В случае волноводов с неоднородным распределением параметров микромагнитное моделирование является единственным способом расчета формы фокусирующего преобразователя. К этому следует добавить, что при переходе к магнитным микро- и наноструктурам основное состояние пленки из-за влияния полей размагничивания становится сильно неоднородным и рассчитать фокусирующие преобразователи в таких структурах также можно лишь с помощью численных методов.

В работе будет исследована применимость подхода микромагнитного моделирования к расчету фокусирующих антенн спиновых волн с помощью пакета «Object Oriented Micromagnetic Framework» OOMMF [10]. Мы покажем, что микромагнитное моделирование обратной задачи – возбуждения и распространения МСВ от точечного источника – позволяет при заданных частоте и поле подмагничивания легко определить линии равной фазы на любом расстоянии от излучателя. Эти линии будут задавать форму и размер фокусирующего излучателя для выбранного фокусного расстояния.

Прежде всего, рассмотрим результаты расчета фокусирующих преобразователей для СВ, распространяющихся в однородной, касательно намагниченной пленке железо-иттриевого гранта (ЖИГ). Будем рассматривать случаи поверхностной СВ (ПСВ), когда волна распространяется перпендикулярно направлению поля подмагничивания H , и обратной объемной СВ (ООСВ), когда волны бегут вдоль поля. Рассматривался случай пленки ЖИГ с параметрами: толщина $d = 4$ мкм, намагниченность насыщения $4\pi M = 1750$ Гс, гиромагнитное отношение $\gamma = 2.8$ МГц/Э, скорость релаксации $\alpha = 10^{-3}$.



Пленка считалась изотропной и намагниченной касательно в поле $H = 1$ кЭ. Размер элементарной ячейки при моделировании был $10 \times 10 \times 4$ мкм³. Размеры точечного источника колебаний намагниченности составляли $20 \times 20 \times 4$ мкм³. Шаг по времени при расчете волновой динамики задавался равным 10^{-11} с.

Следует отметить, что размер элементарной ячейки ограничивает сверху диапазон волновых чисел, наблюдаемых при микромагнитном моделировании. Максимальное волновое число k_{\max} можно оценить исходя из того, что для наблюдения волнового процесса на длину волны должно приходиться как минимум две элементарных ячейки. При выбранных параметрах получаем $k_{\max} = \pi \times 10^3$ см⁻¹. Это соответствует рассмотрению при моделировании лишь дипольной части спектра СВ, характерной для эксперименталь-

ного наблюдения эффектов распространения СВ с использованием традиционных систем возбуждения на основе микрополосковой техники. Отметим также, что размеры источника колебаний также могут приводить к селективности возбуждаемых длин волн. Это, в частности, может проявляться в формировании отдельных зон возбуждения, отвечающих различным пространственным гармоникам в распределении полей источника [8]. Однако в данном случае это несущественно, поскольку рассматриваемый диапазон волновых чисел при выбранных размерах источника попадает в основную зону возбуждения.

На рис. 1 показано распространение СВ, возбуждаемой точечным источником, в середине прямоугольного образца пленки ЖИГ с плоскостными размерами 3×3 мм². Амплитуда входного

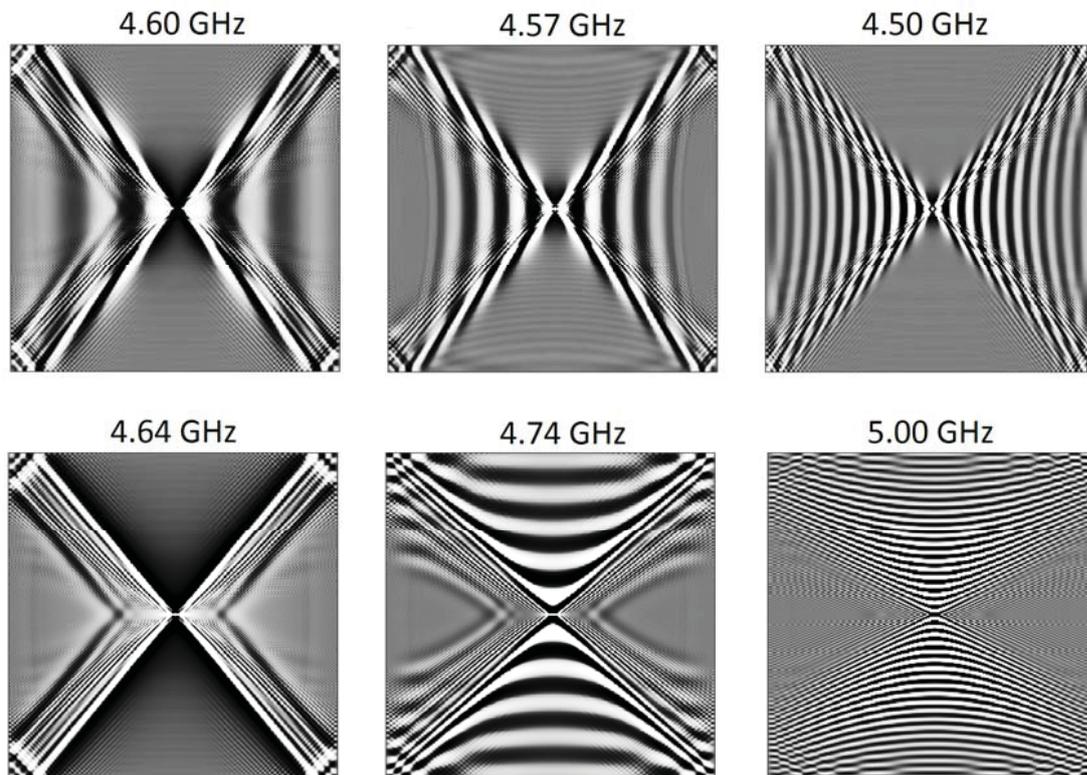


Рис. 1. Результаты расчета эффекта возбуждения и распространения СВ от точечного источника, расположенного в середине прямоугольного образца пленки ЖИГ толщиной 4 мкм, при касательном поле подмагничивания $H = 1$ кЭ (ориентировано горизонтально) в виде мгновенных снимков высокочастотной намагниченности при $t = 80$ нс. Верхние рисунки соответствуют частотам существования ООСВ, нижние – частотам ПСВ

Fig. 1. Snapshots of high-frequency magnetization at $t = 80$ ns representing the modelled effect of spin wave (SW) excitation and propagation from the point emitter in the yttrium-iron garnet (YIG) film with thickness $4 \mu\text{m}$ for the value of external in-plane field $H = 1$ kOe (in the figures it is applied horizontally). Figures in the upper row correspond to the frequencies of existence of backward volume spin waves (BVSW), in the bottom row – surface spin waves (SSW)



сигнала в виде высокочастотного магнитного поля, поляризованного вдоль нормали к пленке, была равна 8 А/м. Частоты входного сигнала указаны на рисунке. Частота $f = 4.64$ ГГц соответствует частоте однородного ферромагнитного резонанса (ФМР) f_0 для пленки ЖИГ, определяемой выражением [18]

$$f_0 = \sqrt{f_H^2 + f_H \cdot f_m}, \quad (1)$$

где $f_H = \gamma \cdot H$, $f_m = \gamma 4\pi M$. Отметим, что частота f_0 также является длинноволновой ($k \rightarrow 0$) границей спектра ПСВ и ООСВ [20]. При этом частоты $f_s > f > f_0$ ($f_s = f_H + 0.5f_m$) соответствуют области возбуждения ПСВ, частоты $f_H < f < f_0$ соответствуют области возбуждения ООСВ. Приведены мгновенные снимки распределения высокочастотной составляющей намагниченности m_z (нормальной к пленке) в фиксированный момент времени $t = 80$ нс после начала возбуждения.

Следуя [16–19], можно предположить, что линии равной фазы на рис. 1 будут определять форму фокусирующих антенн для ООСВ и ПСВ на различных частотах с фокусным расстоянием в центре пленки. Чтобы убедиться в этом, мы оцифровывали выбранные линии равной фазы и аппроксимировали полученные графики полиномиальной функцией, которую затем использовали для задания форм фокусирующих антенн. Далее проводилось микромагнитное моделирование возбуждения и распространения СВ от этих фокусирующих антенн. На рис. 2 представлены результаты такого моделирования при возбуждении фокусирующими антеннами, форма которых была получена для ООСВ частотой $f = 4.5$ ГГц (см. рис. 2 а, б, в) и для ПСВ частотой $f = 4.74$ ГГц (см. рис. 2 з, д, е). Форма антенн на рисунке показана белым цветом. Исследовалось поведение СВ как на частотах $f = 4.5$ ГГц и $f = 4.74$ ГГц, для которых были рассчитаны формы преобразователей указанным выше способом (рисунки помечены звездочкой), так и на других частотах – выше и ниже указанных. Результаты, представленные на рис. 2, получены для пленки с плоскостными размерами, равными 5×5 мм², а время счета бралось равным 100 нс.

Видно, что для частот, для которых была получена форма фокусирующих антенн (см. рис. 2 б, е), положение фокусов хорошо совпадает с ожидаемым из моделирования с точечным источником. Положение точечного источника обозначено как **рс**. Ниже и выше этих частот для выбранной формы антенны фокус оказывается смещенным. Причем в пределах частотного

диапазона $\approx \pm 70$ МГц качество фокусировки не страдает, а фокусное расстояние изменяется незначительно (не более чем на $\approx 5\%$) (см. рис. 2, а, б, е). При отклонении частоты на ≈ 260 МГц от оптимальной, в случае с ПСВ (рис. 2, з), фокусное расстояние уменьшается на $\approx 30\%$, а функция фокусировки нарушается, сохраняясь лишь у центральной части антенны.

Рассмотрим теперь результат моделирования фокусирующих преобразователей СВ в существенно неоднородных пленочных волноводах. Будем рассматривать пленку ЖИГ, полученную ионно-лучевым распылением на подложке кремния (Si) [21]. В силу особенностей технологии [6, 21] осаждения пленок ЖИГ на Si-подложку пленки ЖИГ получаются неоднородными по толщине. Здесь для простоты мы будем обращаться к случаю пленки ЖИГ толщиной $d = 500$ нм с распределением намагниченности по толщине, меняющейся по ступенчато-линейному закону от значений $4\pi M_1 = 1000$ Гс на границе с подложкой до $4\pi M_2 = 1500$ Гс на внешней границе. На рис. 3 для случая поля подмагничивания $H = 500$ Э приведены дисперсионные кривые ПСВ, рассчитанные с помощью программ OOMMF и Semargl [22]. Построение дисперсионной зависимости из данных микромагнитного моделирования при этом проводилось в два этапа [22]. На первом этапе для заданной конфигурации образца с линейным профилем намагниченности и приложенного внешнего поля ($H_y = 500$ Э) находилось равновесное распределение намагниченности. На втором этапе создавалось импульсное отклонение равновесного состояния и проводился анализ пространственно-временной эволюции намагниченности к равновесному состоянию, позволяющий определить спектр собственных волн системы. При проведении расчетов использовались следующие параметры: скорость релаксации СВ $\alpha = 10^{-6}$, гиромагнитное отношение: $\gamma = 2.211 \cdot 10^{-8}$, м/(А×с), обменная жесткость A полагалась однородной и равной $4 \cdot 10^{-12}$ Дж/м. Анализ спектра структуры проводился для случая пленки размером 550 мкм × 550 мкм × 500 нм. При этом для внесения возмущения в основное состояние считалось, что в тонком слое $x \times y \times z = 160$ нм × 550 мкм × 500 нм, играющим роль антенны СВ, подается импульс прямоугольной формы величиной в 10^4 А/м длительностью 10^{-10} с. Вызванная импульсом пространственно-временная динамика намагниченности через временные интервалы 0.5×10^{-10} с (спектральные ширина ~ 20 ГГц)

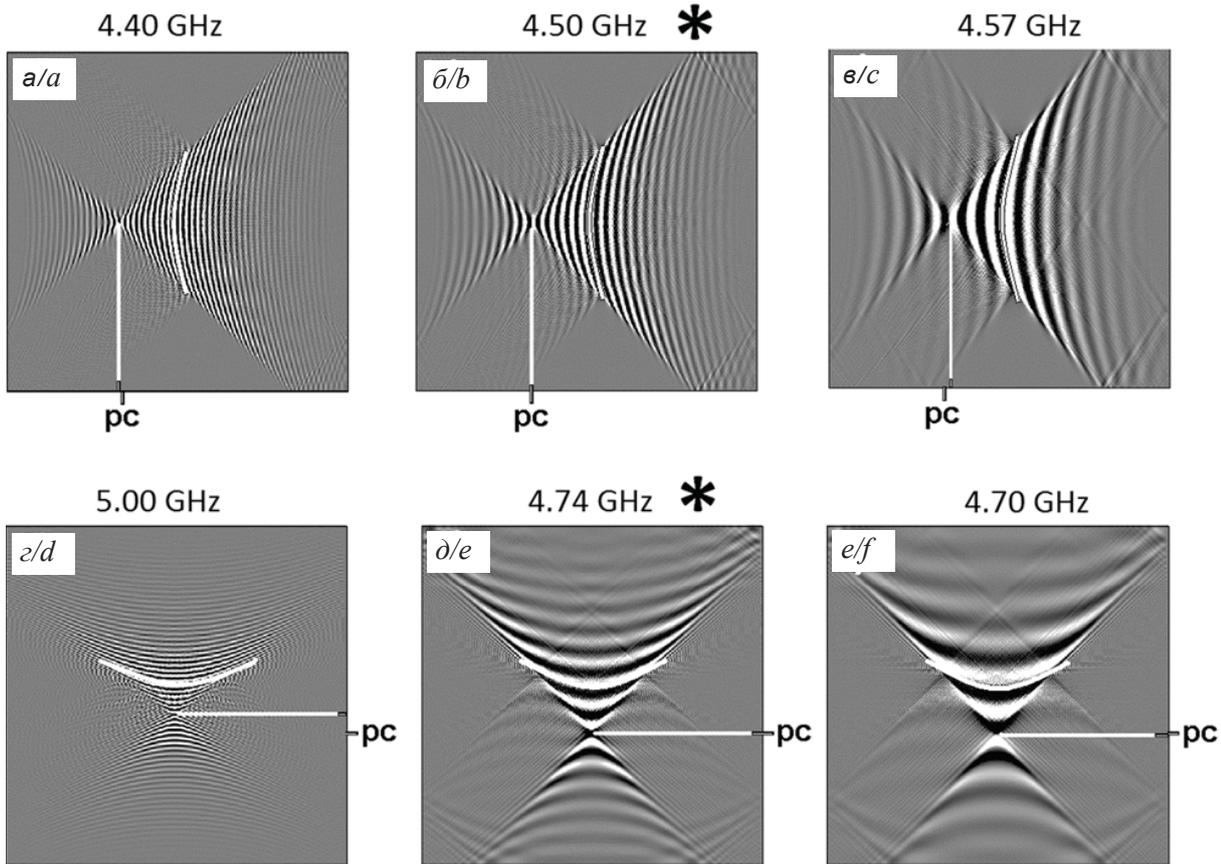


Рис. 2. Результаты расчета эффекта возбуждения и распространения СВ от фокусирующих антенн в пленке ЖИГ толщиной $d=4$ мкм при касательном поле подмагничивания $H=1$ кЭ (ориентировано горизонтально) в виде мгновенных снимков высокочастотной намагниченности при $t=100$ нс. Верхние рисунки соответствуют частотам существования ООСВ (а, б, в), нижние рисунки – ПСВ (з, д, е). Антенны изображены белыми кривыми линиями. Положение точечного источника отмечено как **pc**. Места нахождения фокуса указаны прямыми белыми линиями. Рисунки под звездочками соответствуют случаям, когда СВ возбуждаются на расчетных частотах. В случаях, когда частоты возбуждения СВ не совпадают с расчетными, фокусировка СВ происходит не полностью, и положение фокуса не совпадает с положением точечного источника (а, в, з, е)

Fig. 2. Snapshots of high-frequency magnetization at $t = 100$ ns representing the modelled effect of SW excitation and propagation from the focusing antennas in the YIG film with thickness $4 \mu\text{m}$ for the value of external in-plane field $H=1$ kOe (in the figures it is applied horizontally). Figures in the upper row correspond to the frequencies of existence of BVSW (a, b, c), in the bottom row – SSW (d, e, f). The antennas are represented by white, curved lines. The position of the point emitter is marked as **pc**. The focus locations are indicated by straight white lines. Figures under asterisks correspond to the cases when SW are excited at the calculated frequencies. In cases where the excitation frequencies of SW do not coincide with the calculated ones, the focusing of the SW does not take place completely and the position of the focus does not coincide with the position of the point emitter (a, c, d, f)

сохранялась в течение 200 нс. Далее полученное пространственно-временное распределение намагниченности по образцу обрабатывалось с помощью программы Semargl, которая проводит Фурье-преобразование полученного массива данных по времени и пространству. При этом Фурье-преобразование по временной реализации в каждом слое вдоль заданного направления даёт интенсивности частот, а Фурье-преобразование по пространству от положения этого слоя

относительно места воздействия импульса даёт соответствующее волновое число. В результате получается карта дисперсионной зависимости, показанная на рис. 3, откуда видно, что результаты расчета спектра ПСВ в пленке с линейным характером изменения намагниченности по толщине характерно оказываются близки к случаю двухслойной структуры, составленной из пленок с намагниченностью $4\pi M_1$ и $4\pi M_2$ [21]. Однако в отличие от случая двухслойных

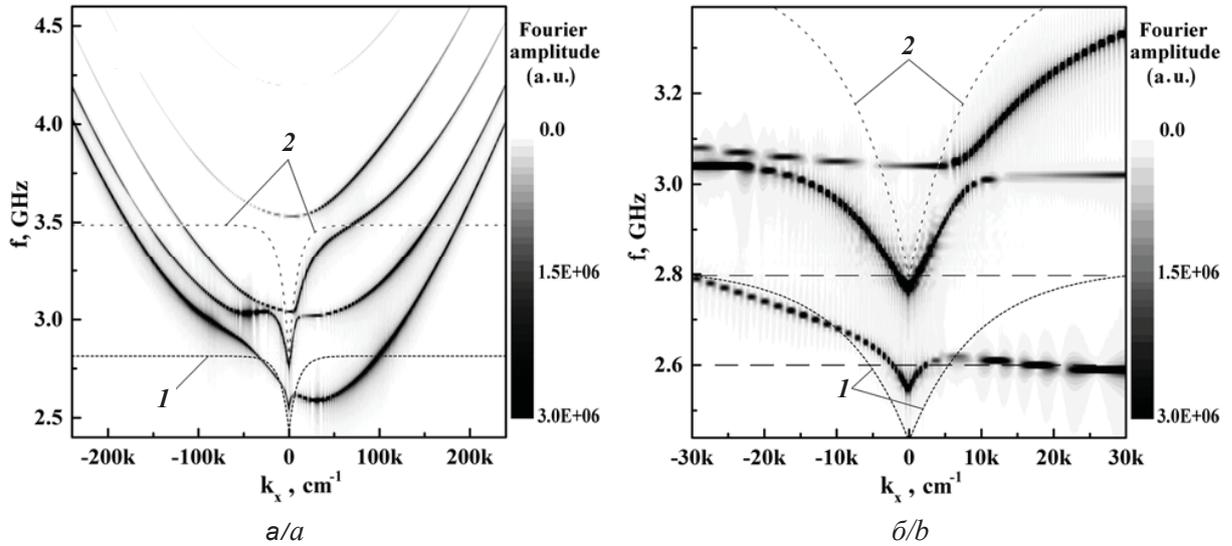


Рис. 3. Дисперсионные зависимости ПСВ в плёнке ЖИГ толщиной $d=500$ нм при поле подмагничивания $H=500$ Э со ступенчато-линейным характером изменения намагниченности по толщине от значений $4\pi M_1=1000$ Гс на границе с подложкой до $4\pi M_2=1500$ Гс на внешней границе в диапазоне волновых чисел от -2.4×10^5 до $+2.4 \times 10^5$ см^{-1} (а) и от -3×10^4 до $+3 \times 10^4$ см^{-1} (б). Горизонтальными штриховыми линиями (б) отмечены частоты $f_1=2.6$ ГГц и $f_2=2.8$ ГГц, на которых проводился расчет фокусирующих преобразователей. Линиями (1) и (2) показаны кривые, рассчитанные с помощью дисперсионного уравнения $f = \gamma \sqrt{(H + 2\pi M)^2 - (2\pi M)^2 \exp(-2kd)}$ для дипольных ПСВ Деймона–Эшбаха для однородных пленок ЖИГ с намагниченностью $4\pi M_1=1000$ Гс и $4\pi M_2=1500$ Гс соответственно

Fig. 3. Dispersion curves for SSW in the YIG film with thickness $d = 500$ nm and with a stepwise linear change of magnetization from the values $4\pi M_1=1000$ G at the border with the substrate till $4\pi M_2=1500$ G at the upper border. Results are presented for the range of wave numbers from -2.4×10^5 till $+2.4 \times 10^5$ cm^{-1} (a) and from -3×10^4 till $+3 \times 10^4$ cm^{-1} (b), for the applied field $H=500$ Oe. Horizontal dashed lines (b) show frequencies $f_1=2.6$ GHz and $f_2=2.8$ GHz that were used in the simulation of focusing transducers. Lines (1) and (2) show the curves calculated using the dispersion equation $f = \gamma \sqrt{(H + 2\pi M)^2 - (2\pi M)^2 \exp(-2kd)}$ of Damon-Eshbach dipole SSW in the uniform YIG films with magnetizations $4\pi M_1=1000$ G and $4\pi M_2=1500$ G, respectively

структур на основе однородных пленок с разными намагниченностями наблюдаются заметные отличия. В частности, наблюдается несовпадение результатов расчета частот длинноволновых ($k \rightarrow 0$) границ дисперсионных кривых с длинноволновыми частотными границами спектра ПСВ, определяемыми формулой (1). Сказанное иллюстрируют дисперсионные кривые дипольных ПСВ Деймона–Эшбаха, показанные штриховыми (2) и (1) пунктирными линиями на рис. 3 и построенные с помощью дисперсионного уравнения ПСВ Деймона–Эшбаха для однородной «свободной» плёнки феррита толщиной $d = 500$ нм [20]:

$$f = \gamma \sqrt{(H + 2\pi M)^2 - (2\pi M)^2 \exp(-2kd)}. \quad (2)$$

Кривая 2 отвечает пленке ЖИГ с намагниченностью $4\pi M_2=1500$ Гс, кривая (1) случаю $4\pi M_1=1000$ Гс. Наиболее вероятная причина указанного несовпадения связана с ограниченными размерами структуры, использованной для моделирования, – СВ большей длины (в

пределе $k \rightarrow 0$) просто не «помещаются» в заданный объем. Отметим, что в спектре пленки также видны обменные моды структуры, которые демонстрируют расталкивание в местах пересечения с модами ПСВ.

На рис. 4, а, б приведены результаты расчета волновых фронтов ПСВ с частотами $f_1=2.6$ ГГц и $f_2=2.8$ ГГц, возбуждаемых «точечным» источником, расположенным в центре пленки ЖИГ квадратной формы. Размеры пленки ЖИГ 500 мкм \times 500 мкм \times 0.5 мкм со ступенчато-линейно изменяющейся по толщине намагниченностью от 1000 Гс до 1500 Гс. Шаги по пространству: 2 мкм \times 2 мкм \times 0.05 мкм. Поле 500 Э направлено вдоль оси Oy . Волны возбуждаются «точечным» источником размером 4 мкм \times 4 мкм с амплитудой СВЧ поля $h_z=1$ Э, которое задается однородным по толщине пленки. Ось Oz считается направленной по толщине пленки. Приведены результаты расчета для трех значений координаты: $z=0$, $z=250$ нм, $z=500$ нм.

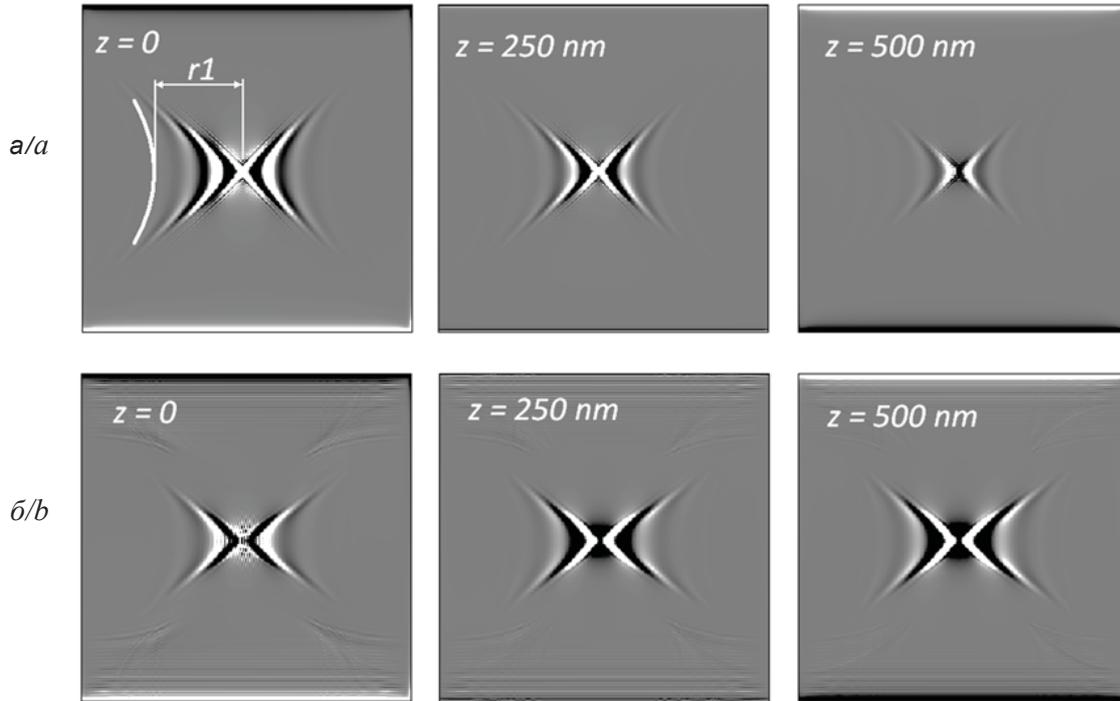


Рис. 4. Микромагнитное моделирование профиля фокусирующего преобразователя в пленке ЖИГ толщиной $d=500$ нм при поле подмагничивания $H=500$ Э со ступенчато-линейным характером изменения намагниченности по толщине от значений $4\pi M_1=1000$ Гс на границе с подложкой до $4\pi M_2=1500$ Гс на внешней границе. Частоты: $f_1=2.6$ ГГц (а); $f_2=2.8$ ГГц (б) выбраны так, чтобы отвечать различным веткам закона дисперсии ПСВ в пленке. Приведены результаты расчета для различных значений координаты z по толщине пленки

Fig. 4. Micromagnetic modeling of the focusing transducer profile in the YIG film with thickness $d=500$ nm and with a stepwise linear change of magnetization across the thickness from the value $4\pi M_1=1000$ G at the border with the substrate till $4\pi M_2=1500$ G at the opposite border. The applied field had the value $H=500$ Oe. Frequencies $f_1=2.6$ GHz (a) and $f_2=2.8$ GHz (b) correspond to different branches of the SSW dispersion in the film. Calculation results are shown for different values of z -coordinate across the film thickness

Можно видеть, что область вблизи точечного источника на выбранных частотах «расплывается». Характер «расплывания» определяется не только выбором частоты, но и координатой z . На частоте $f_2 = 2.8$ ГГц расплывание проявляется при всех значениях координаты z , тогда как на частоте $f_1 = 2.6$ ГГц расплывание вблизи верхней границы пленки, где намагниченность оказывается максимальна, практически отсутствует. Такое поведение является следствием влияния неоднородного обмена в структуре, приводящим к гибридизации поверхностных дипольных ПСВ с обменными объемными модами структуры. Видно, что интенсивность волны на частоте $f_1 = 2.6$ ГГц, отвечающей нижней ветке закона дисперсии ПСВ в пленке, уменьшается с увеличением координаты z , а интенсивность волны на частоте $f_2 = 2.8$ ГГц, отвечающей верхней ветке, наоборот, увеличивается.

На рис. 5 показаны результаты моделирования возбуждения и распространения ПСВ фокусирующей антенной, форма которой была получена в результате аппроксимации линии равной фазы, показанной белым цветом на рис. 4, а для частоты $f = 2.6$ ГГц и $z = 0$ нм. На рис. 5 для $z=0$ нм показано фокусное расстояние r_2 , которое в точности равно расстоянию r_1 от точечного источника до линии равной фазы (см. рис. 4), использовавшейся для построения фокусирующей антенны.

Заключение

Таким образом, в рамках подхода, основанного на микромагнитном моделировании распространения спиновых волн, возбуждаемых точечным источником, предложен метод построения фокусирующих преобразователей для СВ в магнитных микроструктурах. Показана

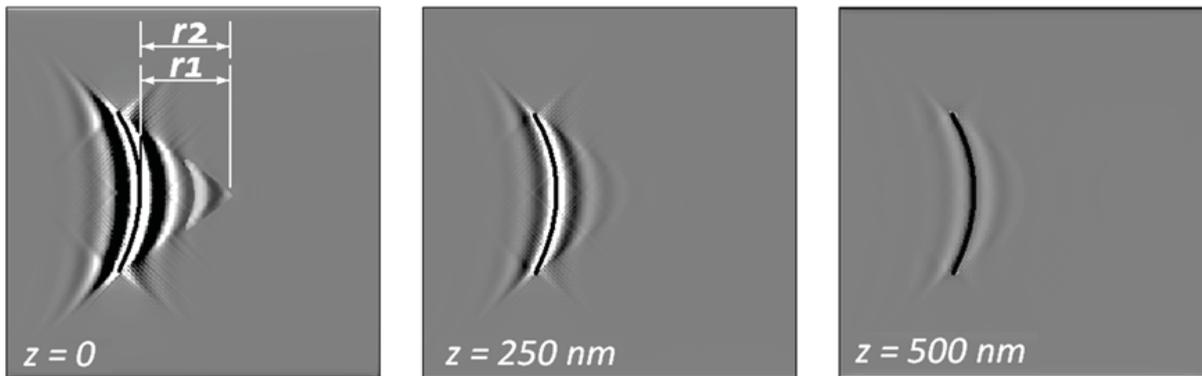


Рис. 5. Микромагнитное моделирование распространения ПСВ от фокусирующего преобразователя в пленке ЖИГ толщиной $d = 500$ нм при поле подмагничивания $H = 500$ Э со ступенчато-линейным характером изменения намагниченности по толщине от значений $4\pi M_1 = 1000$ Гс на границе с подложкой до $4\pi M_2 = 1500$ Гс на внешней границе. Частота $f_1 = 2.6$ ГГц отвечает нижней ветке закона дисперсии ПСВ в пленке. Приведены результаты расчета для различных значений координаты z по толщине пленки. При заданных параметрах расчета расстояния r_1 от точечного источника до антенны и r_2 от антенны до точки фокуса оказываются в точности равны. Антенна показана черной кривой линией

Fig. 5. Micromagnetic modeling of the propagating SSW from the focusing transducer in the YIG film with thickness $d = 500$ nm and with a stepwise linear change of magnetization across the thickness from the value $4\pi M_1 = 1000$ G at the border with the substrate till $4\pi M_2 = 1500$ G at the opposite border. The applied field had the value $H = 500$ Oe. Frequency $f_1 = 2.6$ GHz corresponds to the bottom branch of the SSW dispersion in the film. Calculation results are presented for different values of z -coordinate across the film thickness. With the given parameters of calculation, the distances r_1 from the point emitter to the antenna and r_2 from the antenna to the point of focus appear to be exactly equal. The antenna is shown as a black curved line

работоспособность метода как в случае пленок с однородным распределением параметров, так и в случае структур, характеризующихся существенно-неоднородным основным состоянием, для которых не удастся получить аналитическое выражение для закона дисперсии. Во втором случае численный подход остается единственно возможным способом рассчитать форму преобразователей для фокусировки волновых пучков СВ. Полученные результаты могут быть использованы при разработке устройств обработки информации на основе СВ.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-01092).

Список литературы

1. Никитов С. А., Калябин Д. В., Лисенков И. В., Славин А. Н., Барабаненков Ю. Н., Осокин С. А., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Морозова М. А., Шараевский Ю. П., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Сахаров В. К., Павлов Е. С. Магнетика – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // УФН. 2015. Т. 185, № 10. С. 1099–1128. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510m.1099
2. Khitun A. G., Kozhanov A. E. Magnonic Logic Devices // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2017. Т. 17, вып. 4. С. 216–241. DOI: 10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241
3. Kozhevnikov A., Gertz F., Dudko G., Filimonov Yu., Khitun A. Pattern recognition with magnonic holographic memory device // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106, № 14. 142409.
4. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes // Phys. Rev. 2017. Vol. B 96. 144428.
5. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Grishin S. V., Beginin E. N., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide // Phys. Rev. 2017. Vol. B 96. 060401.
6. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films on Si substrates // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118, July. 023905.
7. Sun Y., Song Y., Wu M. Growth and ferromagnetic resonance of yttrium iron garnet thin films on metals // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101, № 8. 082405.
8. Khivintsev Yu. V., Filimonov Yu. A., Nikitov S. A. Spin



- wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 106, № 5. 052407.
9. Yu H., d'Allivy Kelly O., Cros V., Bernard R., Bortolotti P., Anane A., Brandl F., Huber R., Stasinopoulos I., Grundler D. Sub-100 nm-wavelength spin wave propagation in metal/insulator magnetic nanostructures // *Scientific Reports*. 2014. Vol. 4. 6848. DOI: 10.1038/ncomms11255
 10. Jorzick J., Demokritov S. O., Hillebrands B., Baileul M., Fermon C., Guslienko K., Slavin A. N. Spin wave wells in nonellipsoidal micrometer size magnetic elements // *Phys. Rev. Lett.* 2002. Vol. 88, № 4. 047204.
 11. Hicken R. J., Barman A., Kruglyak V. V., Ladak S. Optical ferromagnetic resonance studies of thin film magnetic structures // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36, № 18. 2183.
 12. Donahue M., Porter D. Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF). Interagency Report NISTIR 6376 / National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, Maryland, Sept, 1999. 897 p.
 13. Berkov D. V., Gorn N. L. Micromagus – soft-ware for micromagnetic simulations. URL: 2008. <http://www.micromagus.de/> (дата обращения: 04.04.2018).
 14. Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V. Generation of propagating spin waves from regions of increased dynamic demagnetising field near magnetic antidots // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, № 16. 162401.
 15. Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A. The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, № 08. 8771. DOI: 10.1038/s41598-017-06531-2
 16. Ваишковский А. В., Гречушкин К. В., Стальмахов А. В., Тюлюкин В. А. Фокусирующий преобразователь поверхностных магнитостатических волн // *Радиотехника и электроника*. 1986. Т. 31, № 4. С. 838–840.
 17. Ваишковский А. В., Гречушкин К. В., Стальмахов А. В., Тюлюкин В. А. Фокусировка объемных магнитостатических волн // *Радиотехника и электроника*. 1987. Т. 32, № 6. С. 1176–1183.
 18. Ваишковский А. В., Стальмахов А. В., Шахназарян Д. Г. Формирование, отражение и преломление пучков магнитостатических волн // *Известия вузов. Физика*. 1988. № 11. С. 57–75.
 19. Стальмахов А. В. Распространение волновых пучков магнитостатических волн в тонкопленочных структурах : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1992. 35 с.
 20. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М. : Физматлит, 1994. 464 с.
 21. Sakharov V. K., Khivintsev Yu. V., Vysotskii S. L., Stognij A. I., Filimonov Yu. A. Enhanced Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films Deposited on Silicon Substrates by Ion-Beam Evaporation // *IEEE Magnetics Lett.* 2017. Vol. 8. 3704804. DOI:10.1109/LMAG.2017.2659638
 22. Dvornik M. Numerical Investigations of Spin Waves at the Nanoscale. PhD thesis. University of Exeter, U.K., 2011. 23 p.

Образец для цитирования:

Дудко Г. М., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Стальмахов А. В., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Расчет фокусирующих преобразователей спиновых волн методом микромагнитного моделирования // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 92–102. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102.

Calculation of Focusing Spin Wave Transducers Using the Method of Micromagnetic Simulation

G. M. Dudko, A. V. Kozhevnikov, V. K. Saharov, A. V. Stalmahov, Yu. A. Filimonov, Yu. V. Khivintsev

Galina M. Dudko, ORCID 0000-0002-7083-4399, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, dugal_2010@hotmail.com

Alexander V. Kozhevnikov, ORCID 0000-0002-8904-475X, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, kzhavl@gmail.com

Valentin K. Saharov, ORCID 0000-0001-7168-1198, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics

of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, valentin@sakharov.info

Andrey V. Stalmahov, ORCID 0000-0001-5428-721X, Saratov State University, 83, Astrahanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, stalmahov@sgu.ru

Yuri A. Filimonov, ORCID 0000-0002-2645-6669, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, yuri.a.filimonov@gmail.com

Yuri V. Khivintsev, ORCID 0000-0002-6228-7428, Saratov branch of the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya Str., Saratov, 410019, Russia, khivintsev@gmail.com

Background and Objectives: Researches in the field of electronic circuit development for microwave informational systems



based on magnetization oscillations and waves have been performing since the 1960s of the last century. The surge of interest in spin waves (SW) during the last decade is caused by the perspective to use SW as information carriers on the sub-micromagnetic and nanometer scale that leads to the fabrication of devices on magnonic principles and a significant miniaturization of spin-wave devices. Besides, the effect of spin wave generation by the spin-polarized current in ferromagnetic nanostructures gives opportunities for possible integration of magnonic and spintronic devices. It should be supplemented that apart from the traditional application of spin waves for microwave signal processing, the possibility to fabricate the logic and holographic memory based on effects of propagation and interference of spin waves has been widely discussed recently. The aim of this work is to develop a new approach for calculating microwave transducers focusing spin waves in thin-film waveguides with a significantly non-uniform distribution of parameters based on the method of micromagnetic modeling. **Materials and Methods:** Micromagnetic simulations were performed by using the free software "Object Oriented Micromagnetic Framework" (OOMMF) provided by the National Institute of Standards and Technology. **Results:** We have shown the possibility to calculate the form of transducers focusing spin waves both in the films with a uniform distribution of magnetic parameters and in the films having the significantly non-uniform equilibrium state. In the last case, the numerical approach remains the only possible. **Conclusion:** In our work, we have proposed a new method to obtain the form of transducers focusing spin waves in magnetic microstructures. It is based on the approach of micromagnetic simulation of spin wave propagation after their excitation by the point emitter.

Key words: spin waves, wave beams, focusing transducers, micromagnetic simulation, non-uniform magnetic films.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Researches (project no. 16-07-01092).

References

1. Nikitov S. A., Kaliabin D. V., Lisenkov I. V., Slavina A. N., Barabanenkov Yu. N., Osokin S. A., Sadovnikov A. V., Baginin E. N., Morozova M. A., Sharaevskii Yu. P., Filimonov Yu. A., Khivintsev Yu. V., Vysotskii S. L., Sakharov V. K., Pavlov E. S. Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics. *Phys. Usp.*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 1002–1028. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510m.1099
2. Khitun A. G., Kozhanov A. E. Magnonic Logic Devices. *Izv. Saratov. Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2017, vol. 17, iss. 4, pp. 216–241 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241.
3. Kozhevnikov A., Gertz F., Dudko G., Filimonov Yu., Khitun A. Pattern recognition with magnonic holographic memory device. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, no.14, 142409.
4. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes. *Phys. Rev.*, 2017, vol. B 96, 144428.
5. Sadovnikov A. V., Davies C. S., Kruglyak V. V., Romanenko D. V., Grishin S. V., Beginin E. N., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide. *Phys. Rev.*, 2017, vol. B 96, 060401.
6. Stognij A. I., Lutsev L. V., Bursian V. E., Novitskii N. N. Growth and spin-wave properties of thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films on Si substrates. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 118, July, 023905.
7. Sun Y., Song Y., Wu M. Growth and ferromagnetic resonance of yttrium iron garnet thin films on metals. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 101, no. 8, 082405.
8. Khivintsev Yu. V., Filimonov Yu. A., Nikitov S. A. Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, no. 5, 052407.
9. Yu H., d'Allivy Kelly O., Cros V., Bernard R., Borlototti P., Anane A., Brandl F., Huber R., Stasinopoulos I., Grundler D. Sub-100 nm-wavelength spin wave propagation in metal/insulator magnetic nanostructures. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, 6848. DOI: 10.1038/ncomms11255.
10. Jorzick J., Demokritov S. O., Hillebrands B., Baileul M., Fermon C., Gusliencko K., Slavin A. N. Spin wave wells in nonellipsoidal micrometer size magnetic elements. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 88, no. 4, 047204.
11. Hicken R. J., Barman A., Kruglyak V. V., Ladak S. Optical ferromagnetic resonance studies of thin film magnetic structures. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, vol. 36, no. 18, 2183.
12. Donahue M., Porter D. *Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF)*. Interagency Report NISTIR 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, Sept, 1999. 897 p.
13. Berkov D. V., Gorn N. L. Micromagus – soft-ware for micromagnetic simulations, 2008. Available at: <http://www.micromagus.de/> (accessed 4 April 2018).
14. Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V. Generation of propagating spin waves from regions of increased dynamic demagnetising field near magnetic antidots. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 107, no.16, 162401.
15. Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A. The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 8, 8771. DOI: 10.1038/s41598-017-06531-2
16. Vashkovskii A. V., Grechushkin K. V., Stalmakhov A. V., Tulukin V. A. Fokusriruyuschiy preobrazovatel poverkhnostnyh magnitostaticeskikh voln [Focusing transducer of surface magnetostatic waves]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1986, vol. 31, no. 4, pp. 838–840 (in Russian).



17. Vashkovskii A. V., Grechushkin K. V., Stalmakhov A. V., Tulukin V. A. Fokusirovka objemnyh magnitostaticeskikh voln [Focusing of volume magnetostatic waves]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1987, vol. 32, no. 6, pp. 1176–1183 (in Russian).
18. Vashkovskii A. V., Stalmakhov A. V., Shakhnazarian D. G. Formirovanie, otrazhenie i prelomlenie puchkov magnitostaticeskikh voln [Forming, reflection and refraction of magnetostatic waves beams]. *Izvestiya VUZ. Fizika*, 1988, no. 11, pp. 57–75 (in Russian).
19. Stalmakhov A. V. *Rasprostranenie volnovykh puchkov magnitostaticeskikh voln v tonkoplennykh strukturakh* [Propagation of magnetostatic waves beams in thin-film structures]. Thesis Diss. Dr. Sci. (Phys.), Moscow, 1992. 35 p. (in Russian).
20. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnitnye kolebaniya i volny* [Magnetic oscillations and waves]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1994. 464 p. (in Russian).
21. Sakharov V. K., Khivintsev Yu. V., Vysotskii S. L., Stognij A. I., Filimonov Yu. A. Enhanced Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films Deposited on Silicon Substrates by Ion-Beam Evaporation. *IEEE Magnetics Lett.*, 2017, vol. 8, 3704804. DOI: 10.1109/LMAG.2017.2659638
22. Dvornik M. *Numerical Investigations of Spin Waves at the Nanoscale*. PhD thesis. University of Exeter, U.K., 2011. 23 p.

Cite this article as:

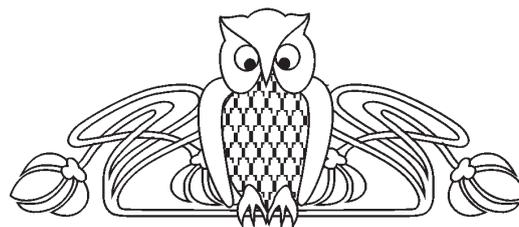
Dudko G. M., Kozhevnikov A. V., Saharov V. K., Stalmahov A. V., Filimonov Yu. A., Khivintsev Yu. V. Calculation of Focusing Spin Wave Transducers Using the Method of Micromagnetic Simulation. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 92–102 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102.



УДК 537.86:530.182

СИНХРОНИЗАЦИЯ ХИМЕРНЫХ СТРУКТУР В АНСАМБЛЯХ НЕЛОКАЛЬНО СВЯЗАННЫХ КУБИЧЕСКИХ ОТОБРАЖЕНИЙ

И. А. Холуянова, С. А. Богомолов, В. С. Анищенко



Холуянова Инна Александровна, магистрант кафедры радиофизики и нелинейной динамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kholuianova@gmail.com

Богомолов Сергей Алексеевич, магистрант кафедры радиофизики и нелинейной динамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, bogomolov22@gmail.com

Анищенко Вадим Семенович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, wadim@info.sgu.ru

Исследуются явления взаимной и внешней синхронизации химерных структур в двух связанных ансамблях из дискретных отображений. Каждый из ансамблей представляет собой одномерное кольцо из нелокально связанных кубических отображений. Подбором параметров режим колебаний индивидуальных осцилляторов соответствовал хаотическому. С целью реализации отличающихся пространственно-временных структур в ансамблях, при отсутствии связи между ними, вводилась расстройка по параметрам нелинейности индивидуальных осцилляторов первого и второго ансамблей. Исследованы явления внешней и взаимной синхронизации химерных состояний при взаимодействии ансамблей. При внешней синхронизации рассматривались режимы одностороннего воздействия элементов второго ансамбля на первый при условии, что реализующиеся структуры в ансамблях при отсутствии связи были различными. Взаимная синхронизация исследовалась при введении симметричной двухсторонней связи. Установлено явление как внешней, так и взаимной корреляции. Эффект синхронизации диагностировался вначале по сходству элементов в пространстве ансамблей. Для количественной диагностики идентичности синхронных структур проводился расчет коэффициентов взаимной корреляции между соответствующими осцилляторами первого и второго ансамблей. Аналогичным методом определялась и область синхронизации в пространстве параметров. Режимам синхронизации отвечало условие близости величины коэффициента корреляции к единице.

Ключевые слова: ансамбль связанных осцилляторов, нелокальная связь, синхронизация, химеры, кубическое отображение.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-103-111

Введение

Исследования коллективной динамики сложных систем находятся в центре внимания многие годы. Установлено, что в ансамблях связанных нелинейных осцилляторов образуются регулярные и хаотические пространственно-временные структуры, наблюдаются эффекты синхронизации, пространственная перемежаемость и др. [1–11]. Сравнительно недавно были открыты так называемые «химерные структуры», для которых характерно сосуществование когерентных (синхронных) и некогерентных (асинхронных) кластеров с четко обозначенными границами в пространстве элементов ансамбля [12–14]. Химерные структуры реализуются в ансамблях, как правило, при условии нелокальной связи между элементами. При нелокальной связи каждый индивидуальный элемент ансамбля взаимодействует с конечным числом ближайших соседних элементов. Отметим, что исследования динамики ансамблей ранее проводились для условий локальной связи, когда каждый элемент взаимодействовал лишь с соседним. И для таких ансамблей во многих работах было установлено и исследовано явление синхронизации пространственно-временных структур [3].

В настоящей работе рассматривается динамика двух связанных ансамблей из хаотических отображений с нелокальной связью. Каждый из ансамблей реализует химерные структуры, и целью работы является анализ взаимной и внешней синхронизации химерных структур при вариации коэффициента связи между ансамблями.

Исследуемая модель

Рассмотрим динамику двух замкнутых в кольцо одномерных ансамблей из кубических отображений, связанных между собой по схеме, изображенной на рис. 1.

Поведение индивидуальных осцилляторов задается кубическим отображением, а каждый осциллятор с номером i ($i = 1, 2, \dots, N$) связан с соответствующим осциллятором второго кольца коэффициентами связи γ_{12} и γ_{21} (см. рис. 1).

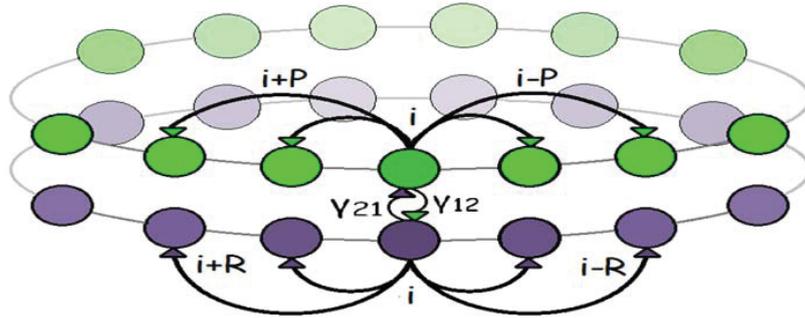


Рис. 1. Схема двух связанных ансамблей, каждый из которых представляет собой кольцо из нелокально связанных хаотических отображений

Fig. 1. Scheme of two coupled ensembles, each representing a ring of nonlocally coupled chaotic maps

Уравнения ансамблей запишем в виде

$$\begin{cases} x_i^{t+1} = f(x_i^t) + \frac{\sigma_1}{2P} \sum_{j=i-P}^{i+P} [f(x_j^t) - f(x_i^t)] + \gamma_{12} F_i^t, \\ y_i^{t+1} = g(y_i^t) + \frac{\sigma_2}{2R} \sum_{j=i-R}^{i+R} [g(y_j^t) - g(y_i^t)] + \gamma_{21} G_i^t, \end{cases} \quad (1)$$

где x_i и y_i – вещественные переменные, t – дискретное время, P и R – число соседей в первом и втором кольцах, $f(x_i^t) = [a_1 x_i^t - (x_i^t)^3] \exp\left(-\frac{(x_i^t)^2}{B}\right)$,

$$g(y_i^t) = [a_2 y_i^t - (y_i^t)^3] \exp\left(-\frac{(y_i^t)^2}{B}\right), \quad \sigma_{1,2} - \text{коэффициенты нелокальной связи.}$$

Фиксируемый параметр $B = 10$. Функции $F_i^t = (g(y_i^t) - f(x_i^t))$ и $G_i^t = (f(x_i^t) - g(y_i^t))$ описывают диффузионную связь между элементами колец. Количество

осцилляторов в ансамблях положим $N = 1000$. Число соседних осцилляторов слева и справа от i -го осциллятора в системах примем $P = R = 250$.

Система уравнений (1) решалась численно при периодических граничных условиях и задании начальных условий x_i^0 и y_i^0 ($i = 1, 2, \dots, N$), случайно распределенных по ансамблю в интервале $[0, 1]$.

Взаимная синхронизация

Для анализа эффекта взаимной синхронизации в уравнениях (1) введем симметричную связь между ансамблями, положив $\gamma_{12} = \gamma_{21} = \gamma$, и расстройку по управляющим параметрам a и σ . Выберем значения $a_1 = 3.4$, $\sigma_1 = 0.55$ и $a_2 = 3.5$, $\sigma_2 = 0.54$. В этом случае в отсутствие связи в ансамблях реализуются различающиеся химерные структуры, показанные на рис. 2.

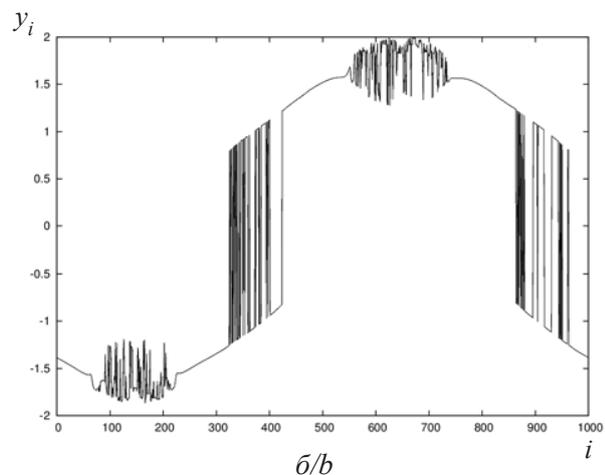
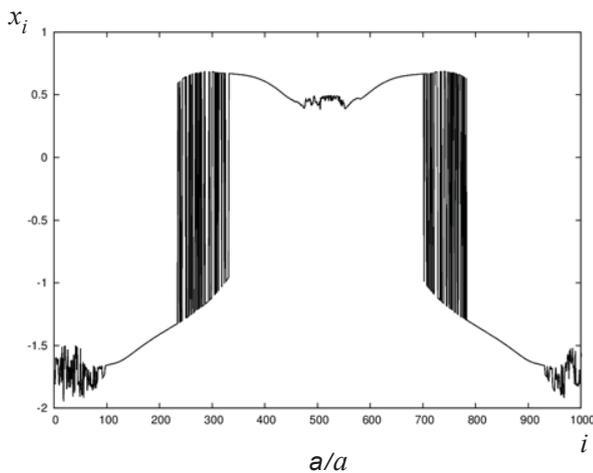


Рис. 2. Мгновенные профили амплитуд x_i (а) и y_i (б) в фиксированный момент времени $t = t^*$ в отсутствие связи $\gamma = 0$.

Параметры: $a_1 = 3.4$, $\sigma_1 = 0.55$ и $a_2 = 3.5$, $\sigma_2 = 0.54$

Fig. 2. Snapshots of amplitudes x_i (a) and y_i (b) at a fixed time $t = t^*$ without coupling $\gamma = 0$. System parameters: $a_1 = 3.4$, $\sigma_1 = 0.55$ and $a_2 = 3.5$, $\sigma_2 = 0.54$



Для изображения химерных структур используем метод расчета мгновенного профиля амплитуд элементов ансамблей x_i и y_i в фиксированный момент времени $t = t^*$ [15–18].

Как видно из рис. 2, химерные структуры в ансамблях x_i и y_i различаются. Рассмотрим, что будет происходить с введением связи $\gamma > 0$. Результаты представлены на рис. 3. Как следует из рис. 3, с ростом коэффициента связи γ химерные структуры в ансамблях x_i и y_i сближаются и при

$\gamma = 0.2$ практически полностью совпадают, свидетельствуя о синхронизации мгновенных профилей. Однако для вывода об эффекте взаимной синхронизации этих результатов недостаточно. Необходимо доказать, что осцилляторы x_i и y_i совершают синхронные колебания во времени и синхронизация реализуется в конечной области параметров. С целью обоснования выполнения указанных условий проводились расчеты коэффициентов взаимной корреляции $R_i(2)$ [19].

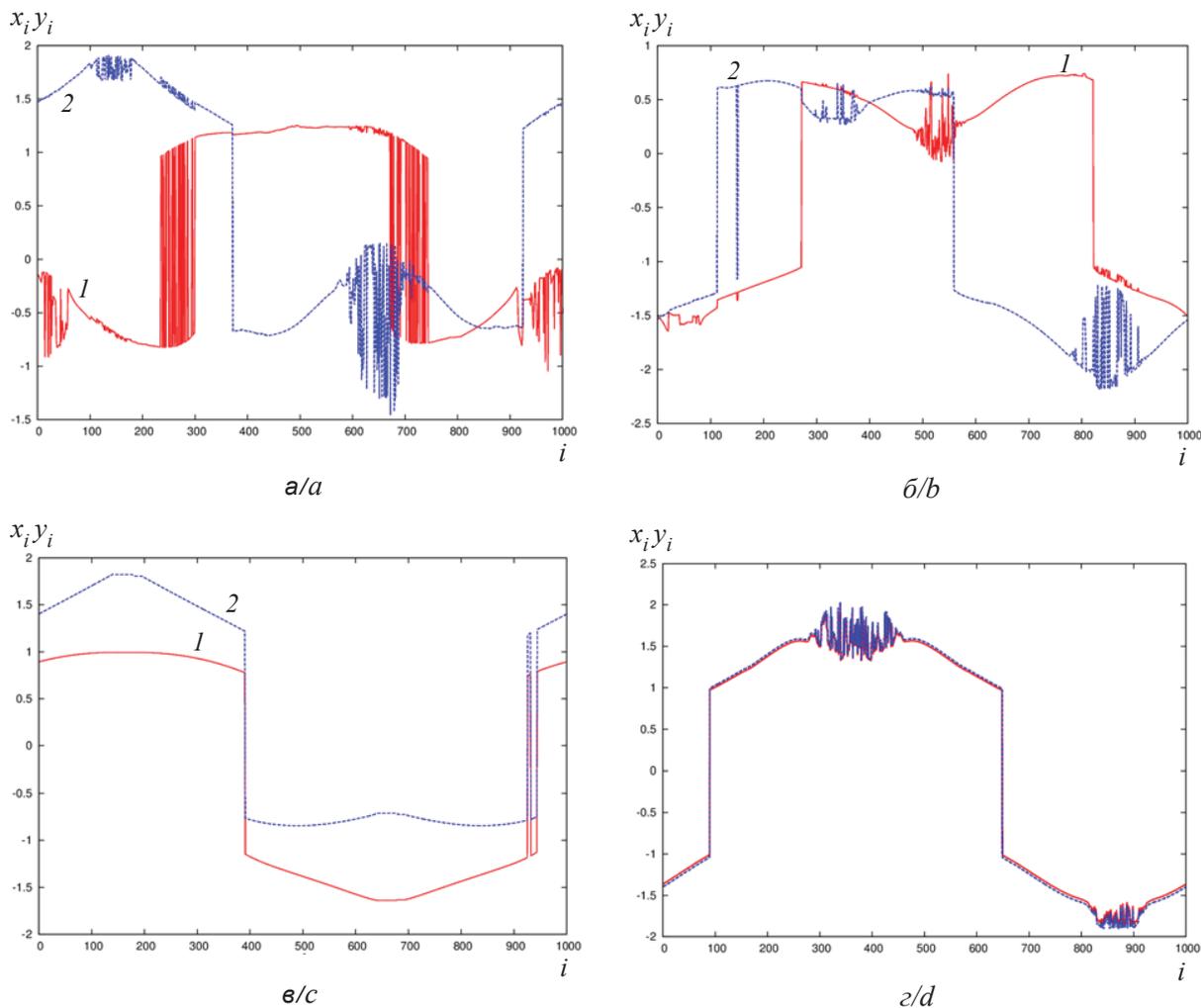


Рис. 3. Эволюция мгновенных профилей в ансамблях x_i (1) и y_i (2) с увеличением коэффициента связи γ : 0.016 (а), 0.034 (б), 0.106 (в), 0.2 (г)

Fig. 3. Evolution of snapshots in ensembles x_i (1) and y_i (2) with increasing the coupling coefficient γ : 0.016 (a), 0.034 (b), 0.106 (c), and 0.2 (d)

Коэффициент взаимной корреляции R_i введем следующим образом:

$$R_i = \frac{\langle \tilde{x}_i(t) \tilde{y}_i(t) \rangle}{\sqrt{\langle \tilde{x}_i(t) \rangle \langle \tilde{y}_i(t) \rangle}}, \quad (2)$$

где $\tilde{x}_i(t) = x_i(t) - \langle x_i(t) \rangle$, $\tilde{y}_i(t) = y_i(t) - \langle y_i(t) \rangle$. Угловые скобки $\langle \dots \rangle$ в уравнении (2) означают усреднение по времени. В случае, когда индивидуальные осцилляторы с номером i совершают синхронные во времени колебания, R_i будет равен



единице. В асинхронном режиме $R_i < 1$. Результаты расчетов R_i для режимов, показанных на рис. 3, представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, коэффициент взаимной корреляции R_i существенно меньше единицы в отсутствие синхронизации (рис. 4, а–в) и прак-

тически равен единице ($0.99 < R_i < 1$) в режиме синхронизации химерных структур (рис. 4, г). Таким образом, результат, представленный на рис. 3, г, действительно характеризует эффект взаимной синхронизации химерных структур в системе (1) с точки зрения их идентичности.

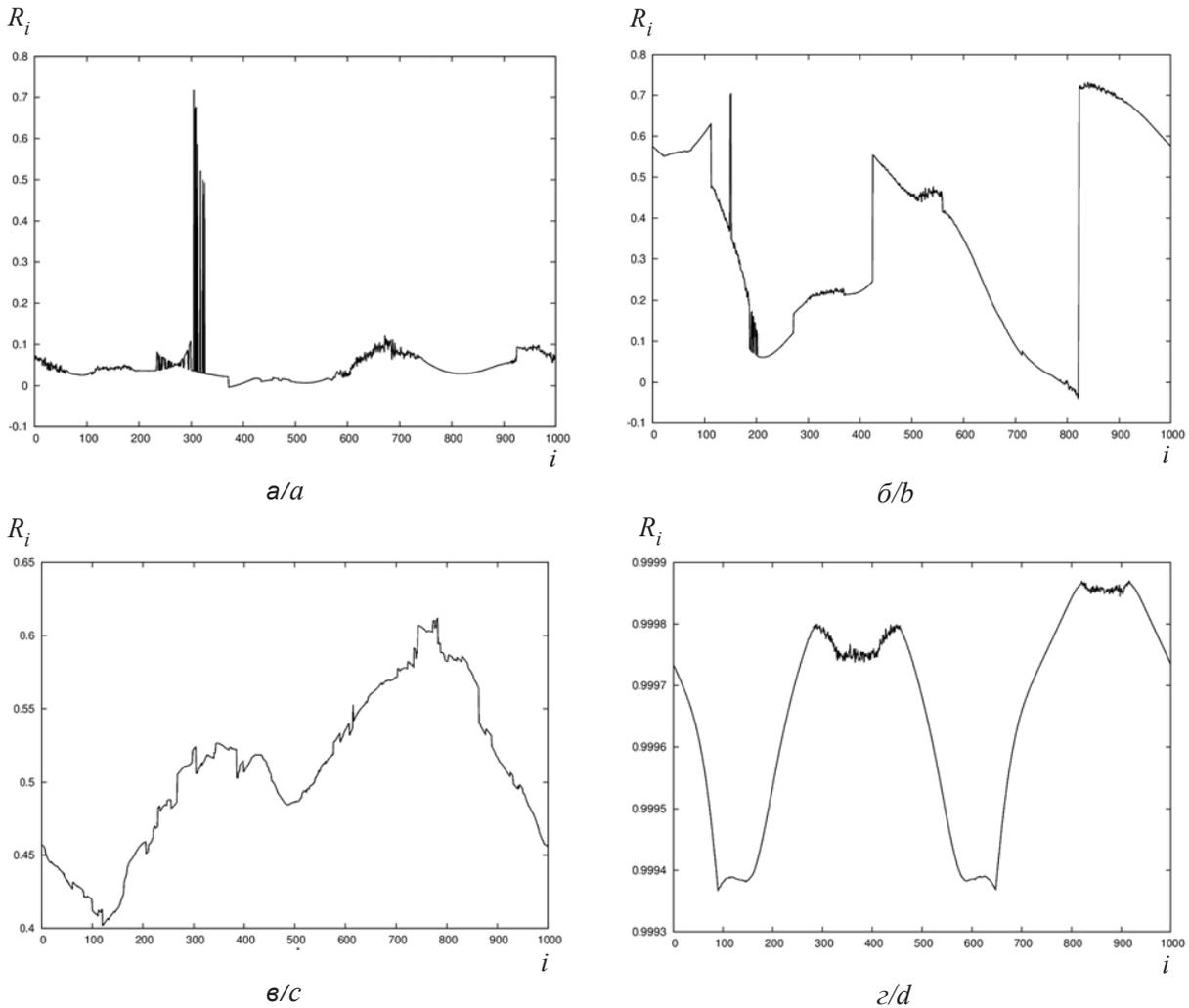


Рис. 4. Коэффициент взаимной корреляции R_i , рассчитанный для режимов, показанных на рис. 3: $\gamma = 0.016$ (а), $\gamma = 0.034$ (б), $\gamma = 0.106$ (в), $\gamma = 0.2$ (г). Параметры ансамблей: $a_1 = 3.4$, $\sigma_1 = 0.55$ и $a_2 = 3.5$, $\sigma_2 = 0.54$

Fig. 4. Cross-correlation coefficient R_i calculated for the regimes shown in fig. 3 for $\gamma = 0.016$ (a), $\gamma = 0.034$ (b), $\gamma = 0.106$ (c), $\gamma = 0.2$ (d). Ensembles' parameters: $a_1 = 3.4$, $\sigma_1 = 0.55$ and $a_2 = 3.5$, $\sigma_2 = 0.54$

Покажем, что идентичность химерных структур сохраняется в конечной области значений коэффициента связи γ между ансамблями. С этой целью были рассчитаны коэффициенты взаимной корреляции для осцилляторов с номером i первого и второго ансамблей, входящих в химерный кластер ($100 \leq i \leq 650$). В качестве примера на рис. 5 представлены

результаты расчетов R_i для осцилляторов химерной структуры с номером $i = 425$. Как видно из графика, приведенного на рис. 5, в заштрихованной области $0.13 \leq \gamma \leq 0.46$ коэффициент взаимной корреляции $R_i \approx 1.0$ ($i = 425$). Итак, можно утверждать, что эффект взаимной синхронизации химерных структур имеет место.

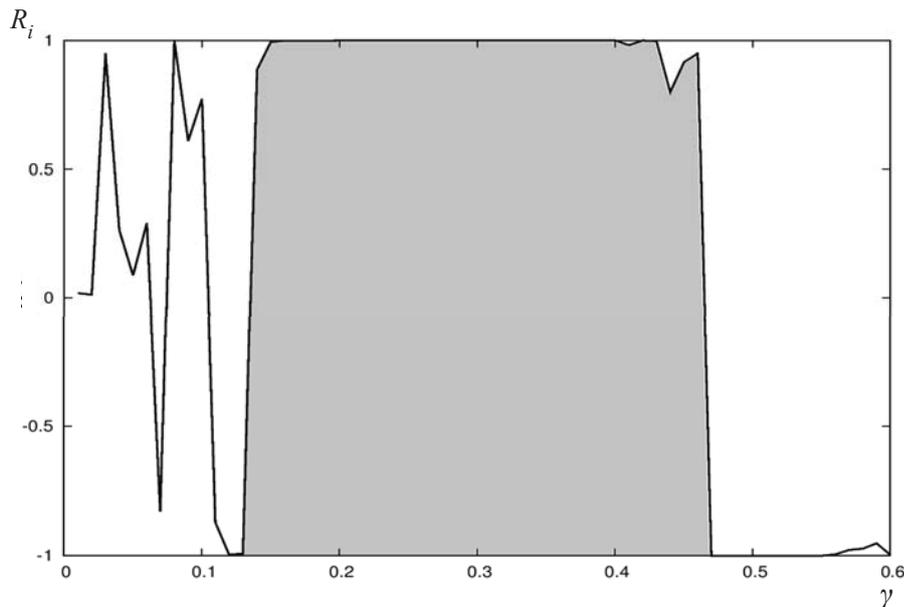


Рис. 5. Область взаимной синхронизации мгновенных профилей в системе (1) для осциллятора $i = 425$. Параметры ансамблей: $a_1 = 3.4, \sigma_1 = 0.55$ и $a_2 = 3.5, \sigma_2 = 0.54$
 Fig. 5. Mutual synchronization region of snapshots in the system (1) for the oscillator $i = 425$. The parameters of the ensembles: $a_1 = 3.4, \sigma_1 = 0.55$ and $a_2 = 3.5, \sigma_2 = 0.54$

Внешняя синхронизация

С целью исследования эффекта внешней синхронизации в уравнениях (1) рассмотрим случай однонаправленной связи, положив $\gamma_{12} = 0, \gamma_{21} = \gamma > 0$. В этом случае осцилляторы ансамбля y_i^t будут воздействовать на соответствующие осцилляторы ансамбля x_i^t (см. рис. 1) однонаправленно. Введем расстройку по параметрам ансамблей x_i^t и y_i^t , положив $a_1 = 3.3, \sigma_1 = 0.51$ и $a_2 = 3.5, \sigma_2 = 0.54$. Значения других параметров выберем, как и в предыдущем случае: $N = 1000, P = R = 250$.

В силу расстройки по параметрам в ансамблях x_i^t и y_i^t в отсутствие связи $\gamma = 0$ реализуются отличающиеся структуры, показанные на рис. 6.

Структура рис. 6, а отвечает режиму пространственно-временного хаоса в ансамбле x_i , а в ансамбле y_i реализуется режим амплитудной и фазовой химер (см. рис. 6, б) [18].

С введением связи $\gamma > 0$ ансамбль y_i будет воздействовать на ансамбль x_i и с ростом γ реализуется эффект внешней (или вынужденной) синхронизации. Результаты представлены на рис. 7.

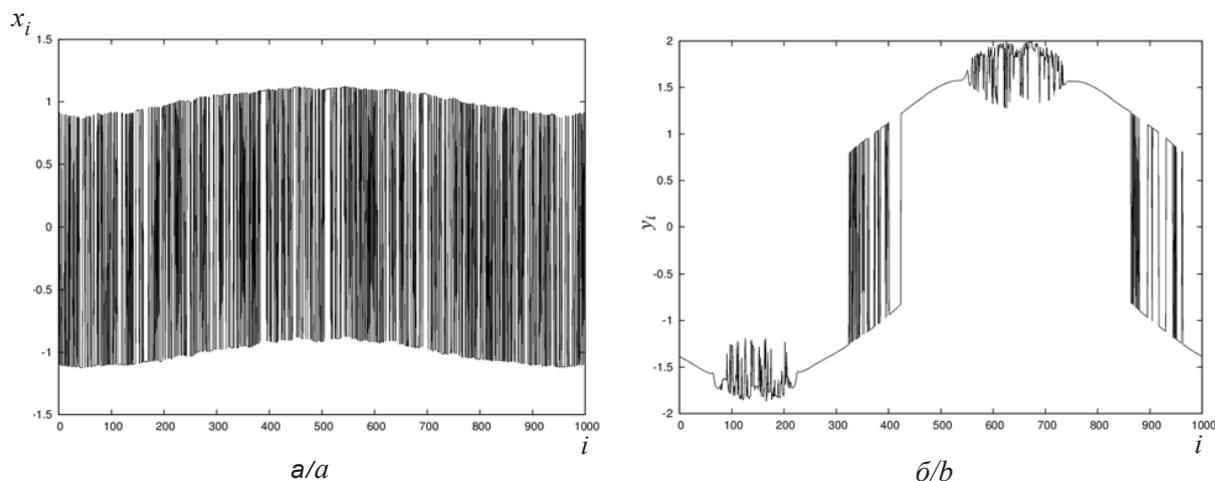


Рис. 6. Мгновенные профили амплитуд x_i^t (а) и y_i^t (б) в отсутствие связи $\gamma = 0$
 Fig. 6. Snapshots of amplitudes x_i^t (a) and y_i^t (b) without coupling $\gamma = 0$

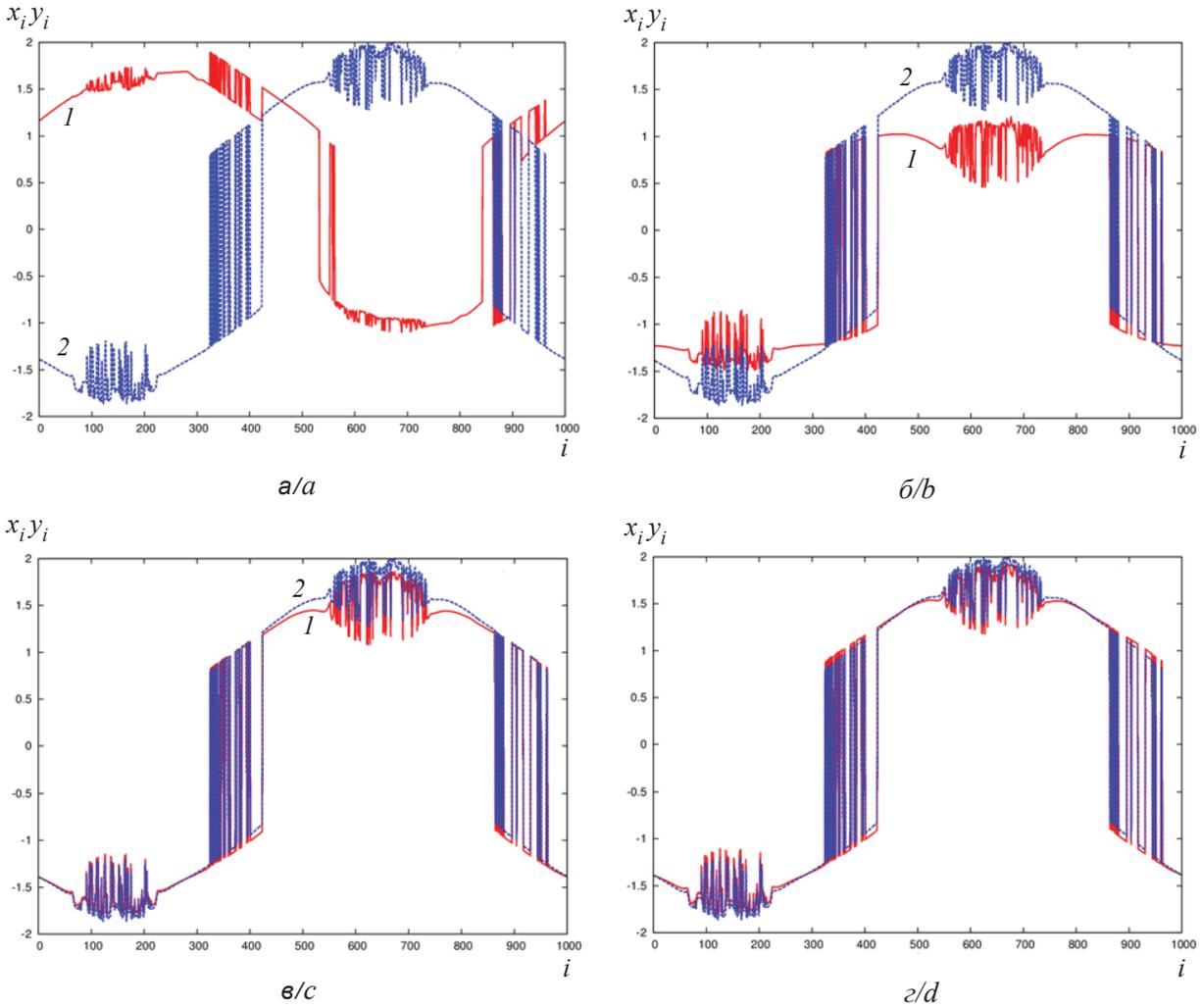


Рис. 7. Мгновенные профили при воздействии осцилляторов ансамбля y_i^t (2) на осцилляторы ансамбля x_i^t (1) для различных значений параметра γ : 0.08 (а), 0.15 (б), 0.24 (в), 0.4 (г). Параметры ансамблей: $a_1 = 3.3$, $\sigma_1 = 0.51$ и $a_2 = 3.5$, $\sigma_2 = 0.54$

Fig. 7. Snapshots under the impact of the ensemble oscillators y_i^t (2) on the ensemble oscillators x_i^t (1) for different values of γ : 0.08 (a), 0.15 (b), 0.24 (c), and 0.4 (d). Ensembles' parameters: $a_1 = 3.3$, $\sigma_1 = 0.51$ and $a_2 = 3.5$, $\sigma_2 = 0.54$

Как видно из рис. 7, при $\gamma = 0.4$ мгновенные профили x_i и y_i практически совпадают. Расчет коэффициента взаимной корреляции (рис. 8) подтверждает режим внешней синхронизации. Величина R_i в синхронном режиме $R_i \approx 0.99$, т.е. близка к единице, в то время как при отсутствии синхронизации R_i существенно меньше единицы.

С целью показать, что в случае внешней синхронизации область синхронизации также характеризуется конечным интервалом значений коэффициента связи γ , проводились расчеты коэффициента взаимной корреляции R_i , аналогичные представленным на рис. 4. Расчеты показали, что коэффициент взаимной корреляции R_i остается практически равным единице в конечной области изменения коэффициента

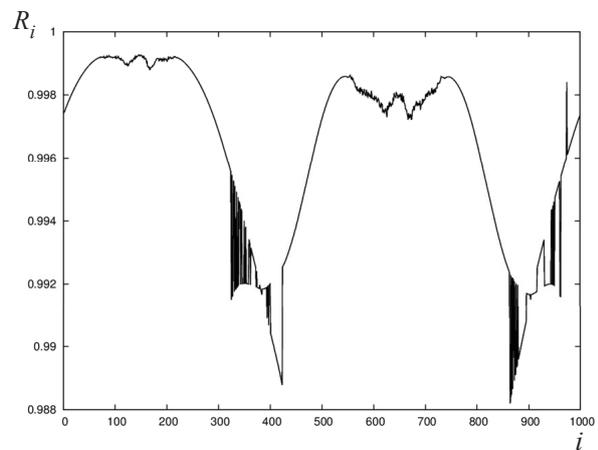


Рис. 8. Коэффициент взаимной корреляции R_i в режиме внешней синхронизации (см. рис. 6, г)

Fig. 8. Cross-correlation coefficient R_i for the external synchronization regime (fig. 6, d)



связи $0.39 \leq \gamma \leq 0.79$ для кластера синхронной химерной структуры $90 \leq i \leq 950$, представленной на рис. 7, з.

Выводы

В работе методами численного эксперимента получены результаты, убедительно свидетельствующие о реализации эффектов взаимной и внешней синхронизации химерных структур в двух связанных ансамблях кубических отображений с нелокальными связями. Путем расчета коэффициента взаимной корреляции R_i (2) подтверждена идентичность синхронных химерных структур и наличие конечной области синхронизации при вариации коэффициента связи между взаимодействующими ансамблями.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 3.8616.2017/8.9).

Список литературы

1. *Afraimovich V. S., Nekorkin V. I., Osipov G. V., Shalfeev V. D.* Stability, Structures and Chaos in Nonlinear Synchronization Networks. Singapore, World Scientific, 1995. 260 с.
2. *Nekorkin V. I., Velarde M. G.* Synergetic phenomena in active lattices. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2002. 357 с. DOI: 10.1007/978-3-642-56053-8
3. *Osipov G. V.* Synchronization in Oscillatory Networks. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2007. 370 с.
4. *Pikovsky A., Rosenblum M. G., Kurths J.* Synchronization : A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge : Cambridge University Press, 2001. 412 с.
5. *Nekorkin V. I., Makarov V. A.* Spatial chaos in a chain of coupled bistable oscillators // *Phys. Rev. Lett.* 1995. Vol. 74. P. 4819–4822.
6. *Nekorkin V. I., Kazantsev V. B., Velarde M. G.* Mutual synchronization of two lattices of bistable elements // *Phys. Lett. A.* 1997. Vol. 236. P. 505–512.
7. *Nekorkin V. I., Voronin M. L., Velarde M. G.* Clusters in an ensemble of globally coupled bistable oscillators // *Eur. Phys. J. B.* 1999. Vol. 9, № 3. P. 533–543.
8. *Belykh V. N., Belykh I. V., Hasler M.* Hierarchy and stability of partially synchronous oscillations of diffusively coupled dynamical systems // *Phys. Rev. E.* 2000. Vol. 62, iss. 5. P. 6332–6345. DOI: 10.1103/PhysRevE.62.6332
9. *Belykh V. N., Belykh I. V., Mosekilde E.* Cluster synchronization modes in an ensemble of coupled chaotic oscillators // *Phys. Rev. E.* 2001. Vol. 63, iss. 3. P. 036216. DOI: 10.1103/PhysRevE.63.036216
10. *Akopov A., Astakhov V., Vadivasova T., Shabunin A., Kapitaniak T.* Frequency synchronization of clusters in coupled extended systems // *Phys. Lett. A.* 2005. Vol. 334. P. 169–172.
11. *Pecora L. M., Sorrentino F., Hagerstrom A. M.* Cluster synchronization, and isolated desynchronization in complex networks with symmetries // *Nature Commun.* 2014. Vol. 5. P. 4079. DOI: 10.1038/ncomms5079
12. *Kuramoto Y., Battogtokh D.* Coexistence of coherence and incoherence in nonlocally coupled phase oscillators // *Nonlinear Phenomena of Complex Systems.* 2002. Vol. 5, № 4. P. 380–385.
13. *Abrams D. M., Strogatz S. H.* Chimera states for coupled oscillators // *Phys. Rev. Lett.* 2004. Vol. 93, iss. 17. P. 174102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.174102
14. *Panaggio M. J., Abrams D. M.* Chimera states : coexistence of coherence and incoherence in networks of coupled oscillators // *Nonlinearity.* 2015. Vol. 28. P. R67–R87. DOI: 10.1088/0951-7715/28/3/R67
15. *Wolfrum M., Omel'chenko O. E.* Chimera states are chaotic transients // *Phys. Rev. E.* 2011. Vol. 84, iss. 1. P. 015201. DOI: 10.1103/physreve.84.015201
16. *Omelchenko I., Maistrenko Y., Hövel P., Schöll E.* Loss of coherence in dynamical networks : spatial chaos and chimera states // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106, iss. 23. P. 234102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.234102
17. *Omelchenko I., Riemenschneider B., Hövel P., Maistrenko Y., Schöll E.* Transition from spatial coherence to incoherence in coupled chaotic systems // *Phys. Rev. E.* 2012. Vol. 85, iss. 2. P. 026212. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.026212
18. *Bogomolov S. A., Slepnev A. V., Strelkova G. I., Schöll E., Anishchenko V. S.* Mechanisms of appearance of amplitude and phase chimera states in ensembles of nonlocally coupled chaotic systems // *Commun. Nonlinear. Sci. Numer. Simul.* 2017. Vol. 43. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.cnsns.2016.06.024
19. *Vadivasova T. E., Strelkova G. I., Bogomolov S. A., Anishchenko V. S.* Correlation analysis of the coherence-incoherence transition in a ring of nonlocally coupled logistic maps // *Chaos.* 2016. Vol. 26. P. 093108. DOI: 10.1063/1.4962647

Образец для цитирования:

Холуянова И. А., Богомолов С. А., Анищенко В. С. Синхронизация химерных структур в ансамблях нелокально связанных кубических отображений // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика.* 2018. Т. 18, вып. 2. С. 103–111. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-103-111.



Synchronization of Chimera States in Ensembles of Nonlocally Coupled Cubic Maps

I. A. Kholuianova, S. A. Bogomolov, V. S. Anishchenko

Inna A. Kholuianova, ORCID 0000-0002-6469-8810, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, kholuianova@gmail.com

Sergey A. Bogomolov, ORCID 0000-0001-8084-3232, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, bogomolov22@gmail.com

Vadim S. Anishchenko, ORCID 0000-0003-2255-1498, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, wadim@info.sgu.ru

Background and Objectives: Effects of mutual and external synchronization of chimera states are studied in two coupled ensembles of discrete maps. Each of the ensembles is a one-dimensional ring of nonlocally coupled cubic maps in the chaotic oscillation mode. In order to create differences in the dynamics of the ensembles when there is no coupling between them, a mismatch is introduced in the parameters of the individual oscillators of the first and second rings. Effects of external and mutual synchronization of chimera states are explored in detail. **Materials and Methods:** The effect of synchronization of spatio-temporal structures in two coupled ensembles of discrete nonlinear oscillators is studied numerically. The identity of synchronous structures and synchronization regions was quantified by calculating the cross-correlation coefficient between the corresponding oscillators of interconnected ensembles. **Results:** The effects of mutual and external synchronization of chimera structures have been established and confirmed by snapshots of the amplitude of oscillations, by calculations of the cross-correlation coefficient between the respective elements of the ensembles and by plotting the synchronization regions on the coupling parameter. **Conclusions:** The paper presents the numerical results which show that the realization of the effects of mutual and external synchronization of chimera states can be realized in two nonlocally coupled ensembles of cubic maps. The identity of synchronous chimera states and the presence of a finite region of synchronization in the variation of the coupling coefficient between the interacting ensembles are confirmed.

Key words: ensemble of coupled oscillators, nonlocal coupling, synchronization, chimera state, cubic map.

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 3.8616.2017/8.9).

References

1. Afraimovich V. S., Nekorkin V. I., Osipov G. V., Shalfeev V. D. *Stability, Structures and Chaos in Nonlinear Synchronization Networks*. Singapore, World Scientific, 1995. 260 p.
2. Nekorkin V. I., Velarde M. G. *Synergetic phenomena in active lattices*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2002. 357 p. DOI: 10.1007/978-3-642-56053-8
3. Osipov G. V. *Synchronization in Oscillatory Networks*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2007. 370 p.
4. Pikovsky A., Rosenblum M. G., Kurths J. *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences*. Cambridge, Cambridge University Press, 2001. 412 p.
5. Nekorkin V. I., Makarov V. A. Spatial chaos in a chain of coupled bistable oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, vol. 74, pp. 4819–4822.
6. Nekorkin V. I., Kazantsev V. B., Velarde M. G. Mutual synchronization of two lattices of bistable elements. *Phys. Lett. A*, 1997, vol. 236, pp. 505–512.
7. Nekorkin V. I., Voronin M. L., Velarde M. G. Clusters in an ensemble of globally coupled bistable oscillators. *Eur. Phys. J. B.*, 1999, vol. 9, no. 3, pp. 533–543.
8. Belykh V. N., Belykh I. V., Hasler M. Hierarchy and stability of partially synchronous oscillations of diffusively coupled dynamical systems. *Phys. Rev. E.*, 2000, vol. 62, iss. 5, pp. 6332–6345. DOI: 10.1103/PhysRevE.62.6332
9. Belykh V. N., Belykh I. V., Mosekilde E. Cluster synchronization modes in an ensemble of coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 63, iss. 3, pp. 036216. DOI: 10.1103/PhysRevE.63.036216
10. Akopov A., Astakhov V., Vadivasova T., Shabunin A., Kapitaniak T. Frequency synchronization of clusters in coupled extended systems. *Phys. Lett. A*, 2005, vol. 334, pp. 169–172.
11. Pecora L. M., Sorrentino F., Hagerstrom A. M. Cluster synchronization, and isolated desynchronization in complex networks with symmetries. *Nature Commun.* 2014, vol. 5, pp. 4079. DOI: 10.1038/ncomms5079
12. Kuramoto Y., Battogtokh D. Coexistence of coherence and incoherence in nonlocally coupled phase oscillators. *Nonlinear Phenomena of Complex Systems*, 2002, vol. 5, no. 4, pp. 380–385.
13. Abrams D. M., Strogatz S. H. Chimera states for coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, vol. 93, iss. 17, pp. 174102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.174102
14. Panaggio M. J., Abrams D. M. Chimera states: coexistence of coherence and incoherence in networks of coupled oscillators. *Nonlinearity*, 2015, vol. 28, pp. R67–R87. DOI: 10.1088/0951-7715/28/3/R67
15. Wolfrum M., Omel'chenko O. E. Chimera states are chaotic transients. *Phys. Rev. E.*, 2011, vol. 84, iss. 1, pp. 015201. DOI: 10.1103/physreve.84.015201
16. Omelchenko I., Maistrenko Y., Hövel P., Schöll E. Loss of coherence in dynamical networks: spatial chaos and chimera states. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, vol. 106, iss. 23, pp. 234102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.234102



17. Omelchenko I., Riemenschneider B., Hövel P., Maistrenko Y., Schöll E. Transition from spatial coherence to incoherence in coupled chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 2012, vol. 85, iss. 2, pp. 026212. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.026212
18. Bogomolov S. A., Slepnev A. V., Strelkova G. I., Schöll E., Anishchenko V. S. Mechanisms of appearance of amplitude and phase chimera states in ensembles of nonlocally coupled chaotic systems. *Commun. Nonlinear. Sci. Numer. Simul.*, 2017, vol. 43, pp. 25–36. DOI: 10.1016/j.cnsns.2016.06.024
19. Vadivasova T. E., Strelkova G. I., Bogomolov S. A., Anishchenko V. S. Correlation analysis of the coherence-incoherence transition in a ring of nonlocally coupled logistic maps. *Chaos*, 2016, vol. 26, pp. 093108. DOI: 10.1063/1.4962647

Cite this article as:

Kholuianova I. A., Bogomolov S. A., Anishchenko V. S. Synchronization of Chimera States in Ensembles of Nonlocally Coupled Cubic Maps. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 103–111 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-103-111.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.315.592

ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ $TlGaSe_2$ И $TlInS_2$

С. А. Д. Кааби, Н. А. Дроздов, О. В. Королик

Кааби Сабах Абед Дауд, аспирант, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, sabah.2011@mail.ru

Дроздов Николай Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергофизики, Белорусский государственный университет, Минск, drozdov@bsu.by

Королик Ольга Васильевна, кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией энергоэффективных материалов и технологий, Белорусский государственный университет, Минск, olga_zinchuk@tut.by

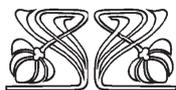
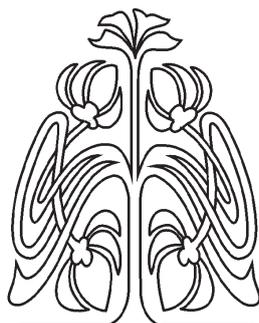
Исследовались кристаллы полупроводников-сегнетоэлектриков $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$, легированные примесями Ag, Al, B, Er, Fe, Nd, Tb в концентрациях от 0.1 до 3%, с целью установления особенностей влияния легирования данными примесями на оптическое поглощение и комбинационное рассеяние света в исследуемых кристаллах. Измерения поглощения проводились путем измерения спектров пропускания и отражения света с последующим расчетом ширины запрещенной зоны по методике Тауца. Спектры комбинационного рассеяния света измерялись с помощью конфокального спектрометра. В качестве источника возбуждения использовались твердотельные лазеры, работающие на длинах волн 473 и 532 нм. Размер светового пятна на образце составлял ~1 мкм. Обратнорассеянный свет детектировался глубоко охлаждаемой кремниевой ПЗС-матрицей с разрешением не ниже 1 см^{-1} . Измерения спектров пропускания и отражения образцов $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$ и расчет ширины запрещенной зоны E_g показали, что при легировании примесями в обозначенных количествах сохраняются значения E_g , известные из литературных данных для нелегированных материалов. Эти результаты подтверждаются данными комбинационного рассеяния в диапазоне температур 21.5 – 300 К.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики-полупроводники, $TlGaSe_2$, $TlInS_2$, запрещенная зона, оптическое поглощение, оптическое пропускание, комбинационное рассеяние, примесь, температурная зависимость.

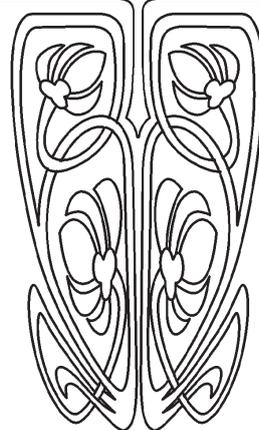
DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-112-122

Введение

Монокристаллы $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$ принадлежат к тройным полупроводниковым соединениям типа $A^3B^3C_6^6$, где A^3 – одновалентный таллий [1]. Кристаллы $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$ кристаллизуются в моноклинную решетку (пространственная группа C_{2h}^6). Характерной особенностью таких кристаллов является наличие структурных фазовых переходов, которые реализуются при понижении температуры относительно комнатной. Такие кристаллы имеют ярко выраженную слоистую структуру, поскольку в разных плоскостях формируются разные типы связей – ковалентная и



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





молекулярная (Ван-дер-Ваальса). В слоистых кристаллах сильно проявляется оптическая анизотропия, анизотропия механических и электрических свойств.

Исследования материалов $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$ ведутся достаточно интенсивно в силу уникальности их оптических и электрофизических свойств и значительных перспектив их практи-

ческого использования. Активно исследуется влияние дефектно-примесной подсистемы кристаллов на специфику их физических свойств и особенности низкотемпературных фазовых переходов.

Значения ширины запрещенной зоны кристаллов $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$, взятые из литературных данных, приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Ширина запрещенной зоны кристаллов $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$
Band-gap energy crystals $TlGaSe_2$ and $TlInS_2$

Кристалл / Crystal	Термическая ширина запрещенной зоны (эВ) [2] / Thermic band-gap energy (eV) [2]	Оптическая ширина запрещенной зоны (эВ) [3] / Optical band-gap energy (eV) [3]
$TlGaSe_2$	2.1–2.2	1.83–2.23
$TlInS_2$	2.45–2.56	2.28–2.55

Вместе с тем сведений о влиянии конкретных легирующих примесей на свойства таких материалов недостаточно и они зачастую противоречивы. В связи с этим целью данной работы являлось установление особенностей влияния легирования примесями Ag, Al, B, Er, Fe, Nd, Tb в концентрациях от 0.1 до 3% кристаллов $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$ на оптическое поглощение и комбинационное (рамановское) рассеяние света (КРС) в этих кристаллах.

1. Методика получения образцов и проведения исследований

Исследуемые кристаллы $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$ были получены методом Бриджмена–Стокбаргера [4] из шихты максимальной чистоты в откачанной и запаянной кварцевой ампуле. Легирование кристаллов осуществлялось в процессе их выращивания путем добавления в шихту необходимых навесок легирующей примеси. Для проведения оптических измерений кристаллы сортировались по максимальной оптической однородности, а для оптического пропускания дополнительно утончались путем скалывания по соответствующим плоскостям.

Измерение спектров пропускания осуществлялось с использованием спектрофотометра MC 122 («Proscan Special Instruments», Беларусь). Оптическая система спектрофотометра выполнена по однолучевой схеме с опорным каналом с использованием двойного монохроматора с плоскими дифракционными решетками. В качестве источников оптического излучения применены дейтериевая и галогенная лампы, в качестве фотоприемника – кремниевый фотодиод. Ток

фотоприемника регистрировался электронной схемой, обрабатывался встроенным компьютером, результаты измерений выводились на встроенный дисплей, внешний принтер и внешний ПК. Спектральный диапазон измерений составлял от 200 до 1100 нм, диапазон измерений коэффициентов пропускания – от 1 до 100 %.

Спектры отражения измерялись с помощью приставки отражения к спектрометру MC 122. Диапазон углов отражения, доступных при измерении спектров отражения, составляет 20° – 180° .

Спектры КРС измерялись с помощью конфокального спектрометра Nanofinder High End («Lotis ТП», Беларусь – Япония). В качестве источников возбуждения использовались твердотельные лазеры, работающие на длинах волн 473 и 532 нм. Для минимизации теплового воздействия на исследуемые объекты мощность излучения, падающего на образец, ослаблялась до уровня 600 мкВт – 2 мВт. Размер светового пятна на образце составлял порядка 1 мкм. Обратнорассеянный свет диспергировался дифракционной решеткой 1800 штрихов/мм и детектировался глубоко охлаждаемой ПЗС-матрицей с разрешением не ниже 1 см^{-1} . Поляризаторы в канале детектирования не устанавливались. Время накопления сигнала составляло, как правило, от 0.5 до 1 мин. Спектральная калибровка прибора выполнялась автоматически по линиям встроенной газоразрядной лампы и обеспечивала точность измерения не хуже 1 см^{-1} . Измеряемые спектры КРС автоматически вводились в компьютер измерительной установки, где проходили математическую обработку с помощью специального программного обеспечения.



2. Оптическое поглощение и определение ширины запрещенной зоны легированных кристаллов TlGaSe₂ и TlInS₂

На рис. 1 представлены кривые пропускания для всех исследованных образцов. Как видно из рисунка, имеются две четко различимые группы спектров, соответствующие типам кристаллов.

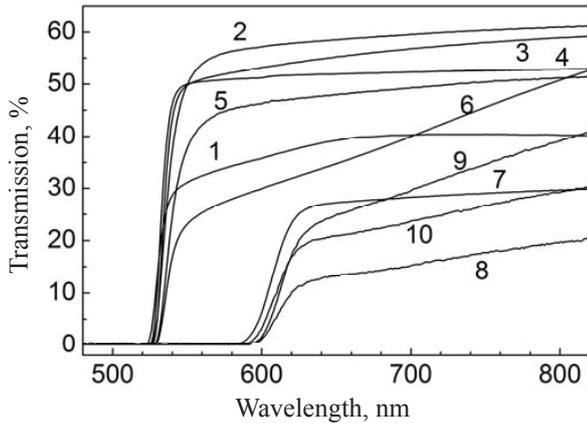


Рис. 1. Спектры оптического пропускания образцов TlGaSe₂ и TlInS₂, легированных разными примесями (табл. 2)

Fig. 1. Spectra of the optical transmission for samples TlGaSe₂ and TlInS₂, doped by different impurities (table 2)

Таблица 2/ Table 2

Образцы, используемые для измерения оптического поглощения
The samples used for measurement of optical transmission

Номер образца / Number of simple	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Материал / Material	TlInS ₂					TlGaSe ₂				
Легировующая примесь / Doping impurity	Al	B	Tb	Er	Fe	Ag	Nd	Tb	Ag	B
Концентрация примеси, % / Impurity concentration, %	0.1	1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	3

Анализ спектров показал, что край поглощения, измеренный по началу пропускания света для исследованных групп образцов, составляет 2.105±0.025 эВ для TlGaSe₂, 2.348±0.014 эВ для TlInS₂. Это согласуется с шириной запрещенной зоны E_g для соответствующего материала (см. табл. 1).

Для более точного определения значений E_g, а также для выявления влияния примесей на ширину запрещенной зоны E_g дополнительно

были проведены расчеты E_g по методике Тауца [5]. Суть этой методики состоит в том, что помимо спектров пропускания света образцом T(λ) измеряются спектры отражения R(λ). Закон Бугера–Ламберта в случае многократного отражения света от передней и задней границ образца имеет вид

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (1)$$

где α – коэффициент поглощения; d – толщина образца.

Дополнив измерения пропускания T(λ) измерениями отражения R(λ), мы получаем зависимость α(λ):

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{(1 - R)^2 + [(1 - R)^4 + 4R^2 T^2]^{1/2}}{2T} \right\}. \quad (2)$$

Ширина запрещенной зоны E_g связана с коэффициентом поглощения α как

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^P \text{ при } h\nu > E_g \quad (3)$$

и α = 0 при hν < E_g,

где hν – энергия квантов света, A – константа, P – параметр, описывающий тип оптического перехода. Для прямых оптических переходов P = 1/2 и для непрямых переходов P = 2. При выполнении (3) будет линеаризована зависимость (αhν)² = f(hν) для прямых переходов и (αhν)^{1/2} = f(hν) для непрямых переходов.

Измерения и расчет по изложенной методике для исследованных образцов TlInS₂ и TlGaSe₂ показали, что линеаризация возможна как для прямых переходов, так и для непрямых переходов, что соответствует литературным данным для нелегированных образцов [6, 7]. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Точность определения величины E_g составляла ±0.02 эВ. Таким образом, можно сделать вывод, что влияния примесного состава на ширину запрещенной зоны обнаружено не было.

Кристаллы TlInS₂ и TlGaSe₂, легированные Ag, имеют более сложный характер поглощения света. На кривых пропускания у этих материалов имеется по два участка спектра с разным наклоном. Одной из причин наблюдаемого эффекта может быть способность серебра к интеркарированию в слоистых кристаллах A³B³C⁶₂ [8], т.е. встраиванию атомов Ag в ван-дер-ваальсовскую щель без существенного искажения массива основной решетки. При этом в матричной решетке организуется несоразмерная сверхрешетка, возможно, со сформированными в ней квантовыми



Таблица 3 / Table 3

Рассчитанные значения оптической ширины запрещенной зоны для измеренных образцов
The calculated values of optical band-gap energy for the measured samples

Материал / Material	TlInS ₂						TlGaSe ₂			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_g (прямые переходы) / E_g (vertical electronic transition)	2.47	2.48	2.49	2.47	2.45	2.48	2.25	2.24	2.29	2.28
E_g (непрямые переходы) / E_g (non-vertical electronic transition)	2.26	2.28	2.28	2.27	2.28	2.26	1.97	1.99	2.00	1.96

точками, а зона Бриллюэна слоистого кристалла с несоразмерной сверхструктурой в направлении оси C сворачивается на величину, кратную числу периодов сверхрешетки. Поскольку оптические дисперсионные ветви в этом направлении бездисперсионны [9], то и плотность состояний будет иметь линейчатый характер, что согласно [10] является основным критерием возникновения условия пространственного квантования. Сформированная сверхрешетка будет обладать всеми признаками обычной решетки, но растянутой в пространстве, и будет иметь существенно меньшие значения энергетических щелей типа E_g , а следовательно, меньший (более пологий) наклон на кривой оптического пропускания.

Данная трактовка является непротиворечивой, однако требует дополнительного изучения и, прежде всего, исследования процессов поглощения с использованием различной геометрии эксперимента (ориентация образца, поляризация света).

3. Комбинационное рассеяние света в кристаллах TlGaSe₂ и TlInS₂

Общая характеристика спектров КРС. Все образцы, представленные в табл. 2, были исследованы при комнатной температуре со стороны разных плоскостей кристаллов и при их разной ориентации относительно плоскости поляризации света. Параметры образцов, исследованных методом КРС, представлены в табл. 4.

Таблица 4 / Table 4

Параметры образцов, исследованных методом КРС
Parameters of the samples studied by the Raman method

Материал / Material	TlGaSe ₂						TlInS ₂				
	N90	N91	N92	N93	N94	N101	N95	N96	N97	N102	N103
Легирующая примесь / Doping impurity	Al	B	Ag	Tb	Fe	Nd	Ag	Ag	B	Er	Tb
Концентрация примеси, % / Impurity concentration, %	0.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	3.0	0.1	0.1

На рис. 2 и 3 представлены спектры образцов TlGaSe₂ <B, 1%> и TlInS₂ <Tb, 0.1%>, полученные в разных геометриях эксперимента. Необходимо отметить, что в ряде случаев спектр КРС сопровождался спектром фотолюминесценции образца.

Эксперименты показали, что спектры КРС всех легированных образцов в основном совпадают со спектрами КРС образцов TlGaSe₂ и TlInS₂ соответственно, приведенными в литературе, например [11]. Соотношение интенсивностей линий спектра и их точное положение зависит от геометрии опыта, это иллюстрируют рис. 2, 3.

Как видно из этих рисунков, при изменении геометрии не происходит сколь-нибудь заметных изменений спектров. Однако при изменении геометрии опытов в ряде случаев происходило существенное увеличение интенсивности люминесценции образца [12].

В спектрах комбинационного рассеяния света кристаллов TlGaSe₂, легированных бором (1%), при возбуждении с торцевой стороны при комнатной температуре впервые обнаружена линия 160 см⁻¹, относительная интенсивность которой определяется поляризацией возбуждающего излучения.

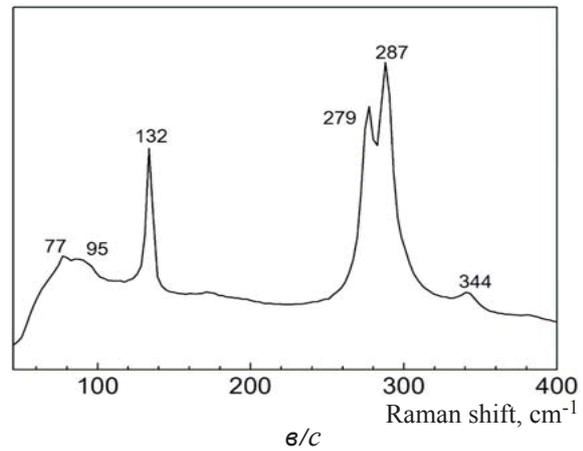
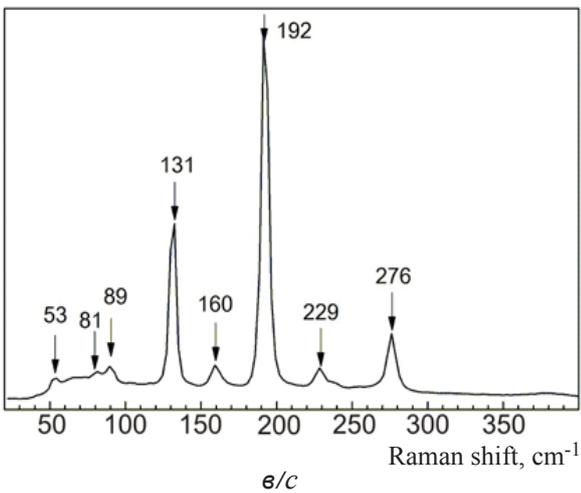
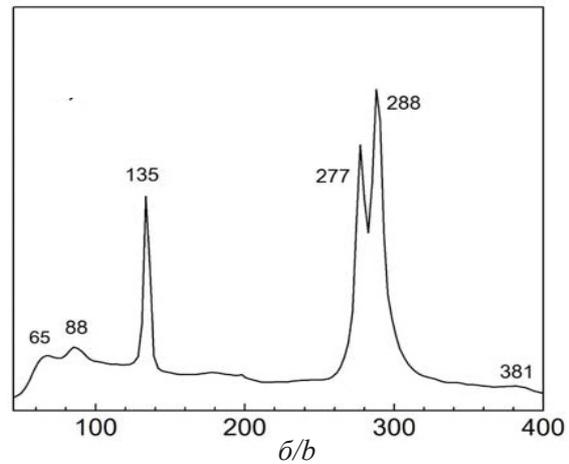
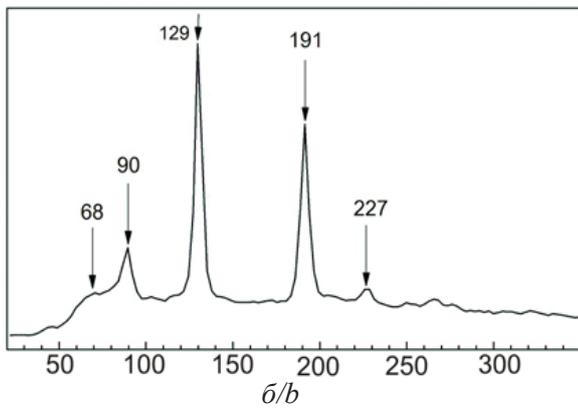
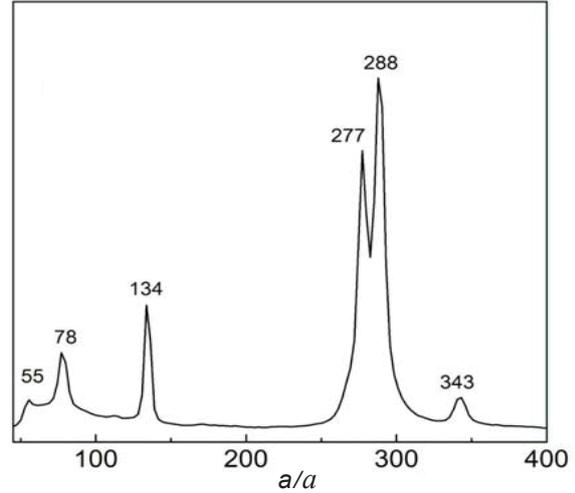
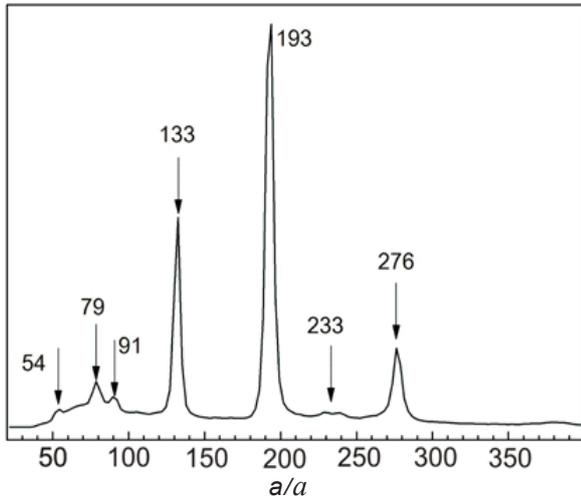


Рис. 2. Спектры КРС образца TI GaSe_2 <B, 1%> в разных геометриях измерений: *a* – со стороны плоской поверхности (плоскости скола) образца; *b* – со стороны торца образца; *c* – то же, что и *b*, но образец повернут на 90° вокруг оси возбуждающего пучка света

Fig. 2. Raman spectra for the sample TI GaSe_2 <B, 1%> in different measurement geometries: *a* – from the side of a plane surface (plane of cleavage) of the sample; *b* – from the end face of the sample; *c* – the same as on Fig. *b*, but the sample is rotated on 90° around the axis of the exciting beam of light

Рис. 3. Спектры КРС образца TI InS_2 <Tb, 0.1%> в разных геометриях измерений: *a* – со стороны плоской поверхности (плоскости скола) образца; *b* – со стороны торца образца; *c* – то же, что и *b*, но образец повернут на 90° вокруг оси возбуждающего пучка света

Fig. 3. Raman spectra for the sample TI InS_2 <Tb, 0.1%> in different measurement geometries: *a* – from the side of a plane surface (plane of cleavage) of the sample; *b* – from the end face of the sample; *c* – the same as on Fig. *b*, but the sample is rotated on 90° around the axis of the exciting beam of light



Относительная устойчивость и независимость отдельных линий спектра КРС от геометрии опыта вполне объяснима. В силу низкой симметрии кристаллов $A^3B^3C^6_2$ те или иные линии КРС могут быть реализованы лишь в конкретной геометрии, включающей в себя не только расположение образца относительно светового пучка, но и поляризацию возбуждающей световой волны и поляризацию КРС. Однако в силу того, что канал возбуждения, реализованный через микроскопный объектив, не может иметь 100% поляризации, а в канале регистрации поляризатор не предусмотрен, то изменения геометрии опытов лишь частично меняют соотношение отдельных линий.

Анализ полученных результатов показывает, что спектры образцов $TlGaSe_2$ (№ 90 и № 93) идентичны друг другу, равно как идентичны друг другу спектры образцов $TlInS_2$ (№ 95, 96, 97, 102, 103), из чего следует вывод, что тип легирующей примеси в вышеобозначенных концентрациях не оказывает влияния на характер и форму линий спектров КРС.

Температурные исследования КРС. Температурные измерения проводились в диапазоне температур 22 – 294 К на образцах № 90, 93 ($TlGaSe_2$) и № 95, 96, 97, 102, 103 ($TlInS_2$). Все измерения осуществлялись со стороны поверхности скола. Полученные спектры КРС при разных температурах для образцов № 93 и № 102 приведены на рис. 4, 5.

Особый интерес представляет область температур, где происходят фазовые переходы 2-го рода, – перестроение кристаллической решетки.

Имеются данные по измерению рамановского (комбинационного) рассеяния в таких кристаллах. В работе [13] указано, что температурный сдвиг линий КРС должен подчиняться статистике Бозе – Эйнштейна, т. е. быть монотонным. Появление немонотонности в температурной зависимости положения линий как раз и может свидетельствовать о наличии фазового перехода.

Следует отметить что, во-первых, в литературе нет сведений о явных изменениях в спектрах КРС, соответствующих температурам перехода из соразмерной низкотемпературной фазы в несоразмерную (T_c) и из несоразмерной в соразмерную высокотемпературную (T_i). Во-вторых, измерения КРС с применением конфокального микроскопа, как в нашем случае, создают на образце очень высокую плотность освещения. Это может способствовать как возникновению

фотостимулированных структурных фазовых переходов, о чем неоднократно сообщалось в литературе, правда применительно к другим сегнетоэлектрикам-полупроводникам [14], так и к локальному перегреву кристалла. Фотостимулированные фазовые переходы могут существенно изменить картину чередования соразмерная–несоразмерная и несоразмерная–соразмерная фаза на температурной шкале и точки перехода T_c и T_i между этими фазами.

Анализ спектров КРС при разных температурах не дал каких-то особенностей в области температур фазовых переходов, равно как и в других исследованных областях температур.

Однако представляет интерес следующий полученный нами результат. Используемая установка для исследований КРС позволяет параллельно с рамановскими измерениями производить визуальное наблюдение и фотографирование участка поверхности образца, включающего область оптического возбуждения. На некоторых образцах в процессе понижения температуры была зафиксирована следующая последовательность событий:

- оптические воздействия (30 с, оптическая мощность 2 мВт в пятне диаметром ~ 5 мкм), которые велись через 20 К по мере охлаждения образца от комнатной температуры до температуры 180 К, не приводили к образованию каких-либо следов на поверхности образца;
- при $T=160$ К после воздействия лазерного луча на образце образовывалось светлое пятно диаметром примерно в 10–12 раз больше, чем диаметр лазерного светового пятна во время освещения. Это пятно и другие таким же образом сформированные пятна оставались устойчивыми на протяжении дальнейших оптических воздействий в процессе понижения температуры вплоть до 21,5 К. После окончания экспериментов при отогреве образца до комнатной температуры пятна исчезали;
- после охлаждения до 140 К и лазерного воздействия на поверхности образца также образовывались светлые пятна, но их диаметр был существенно меньше, чем в предыдущем случае. При дальнейшем понижении температуры пятна уменьшались и при 100 К почти не наблюдались;
- при отогреве образца и последующих циклах охлаждения процесс повторялся.

Появление пятен, видимых в оптическом микроскопе под действием мощного светового потока, указывает на то, что в полупрозрачной матрице образуются центры рассеивания,

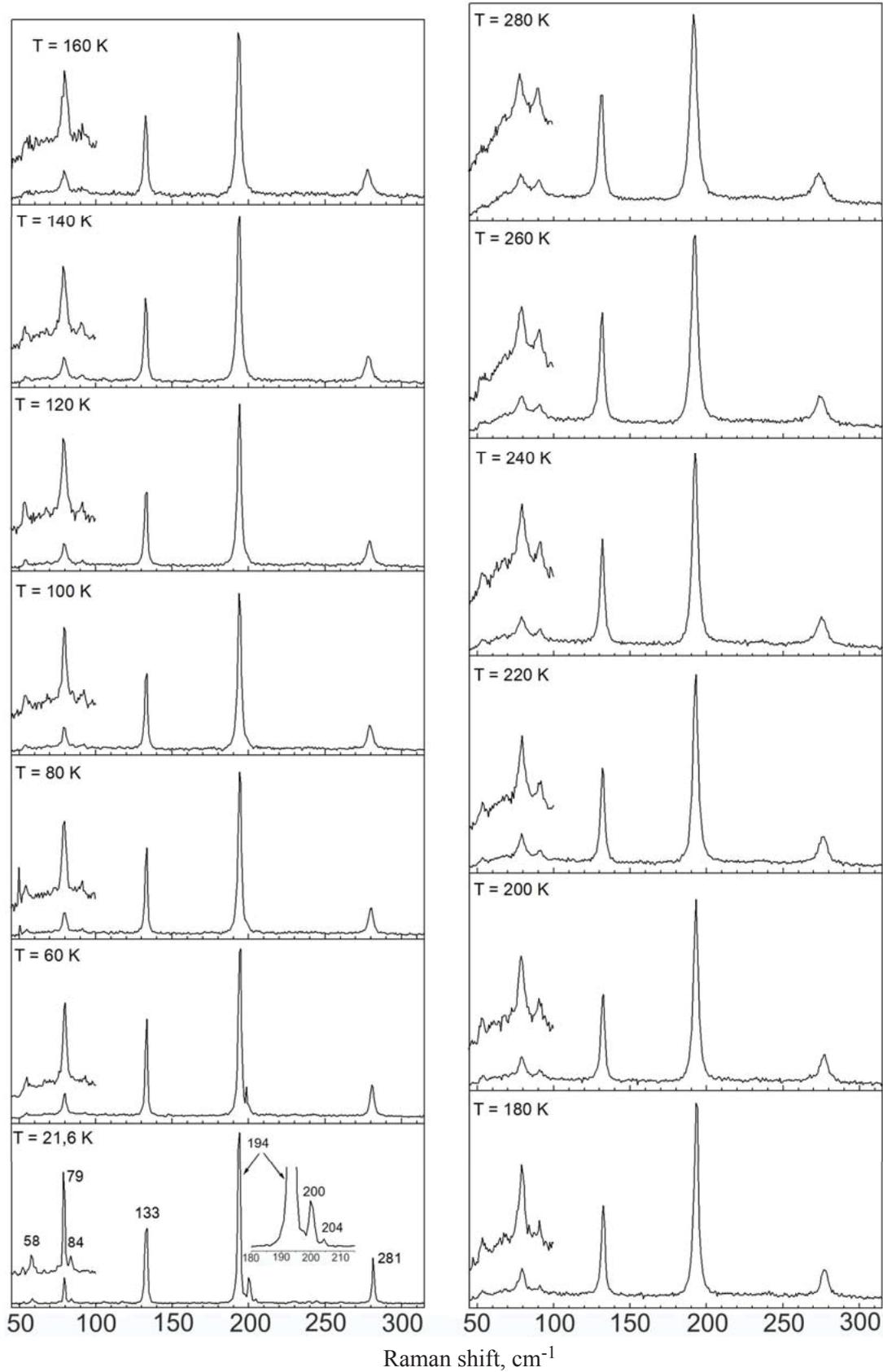


Рис. 4. Спектры КРС образца № 93 (TlGaSe₂ <Tb, 0.1%>), полученные при разных температурах
Fig. 4. Raman spectra for the sample no. 93 (TlGaSe₂ <Tb, 0.1%>), derived at different temperatures

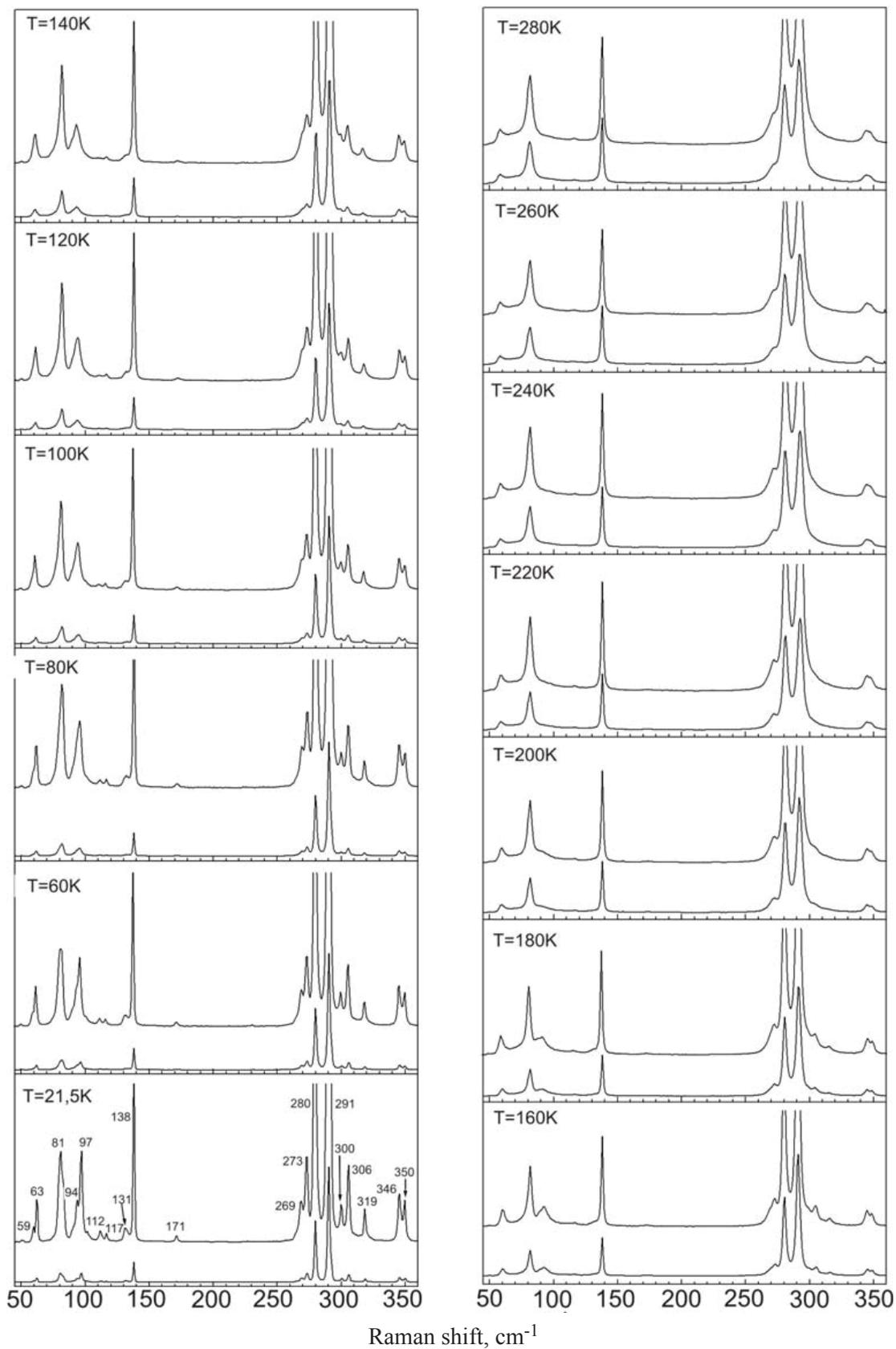


Рис. 5. Спектры КРС образца № 102 (TlInS_2 , $\langle \text{Er}, 0.1\% \rangle$), полученные при разных температурах

Fig. 5. Raman spectra for the sample no. 93 (TlInS_2 , $\langle \text{Er}, 0.1\% \rangle$), derived at different temperatures



центры окраски, либо какие-то иные структурные центры, т.е. происходит фотоиндуцированный структурный фазовый переход. Тот факт, что при понижении температуры диаметр появляющихся пятен уменьшался, свидетельствует о том, что наблюдаемый фотоиндуцируемый переход подобен обычному температурному переходу из низкотемпературной фазы в более высокотемпературную. Однако образовавшаяся фаза не является полным аналогом обычной температурной фазы. Последовавшее от 160 К глубокое охлаждение не вызвало трансформацию этой фазы, и только нагрев до комнатной температуры привел к ее ликвидации.

Заключение

Оптические исследования кристаллов $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$, легированных различными примесями, представленные в настоящей работе, показывают сложность и многообразие свойств исследуемых объектов. Положение усугубляется еще и тем, что в настоящее время технология получения указанных материалов далека от совершенства, и, кроме того, выращенные кристаллы могут состоять из нескольких политипов с различными электрофизическими и оптическими характеристиками. Однозначность и предсказуемость оптических измерений в таких системах зависит помимо того от геометрии измерений, т.е. от точности выставления кристаллографических осей кристалла относительно оптических осей пучков возбуждающего и регистрируемого оптического излучения (включая учет плоскостей поляризации излучения). К сожалению, выполнить в полном объеме все эти требования не всегда представляется возможным.

Тем не менее ряд результатов, полученных в настоящей работе, является обоснованным и представляет несомненный научный интерес.

- Измерения спектров пропускания и отражения образцов $TlGaSe_2$, $TlInS_2$ и последующий расчет ширины запрещенной зоны E_g показали, что при легировании примесями в обозначенных количествах E_g сохраняет значения, известные из литературных данных для нелегированных материалов.

- Экспериментально показано, что спектры пропускания материалов $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$, легированных серебром, содержат помимо обычного участка с наклоном, определяемым E_g , участок с гораздо меньшим наклоном. Это можно интерпретировать как возникновение в матричной решетке несоответствующей сверхрешетки вследствие

интеркаляции серебра в ван-дер-ваальсовскую щель без существенного искажения массива основной решетки.

- Анализ результатов КРС показывает, что спектры образцов $TlGaSe_2$, легированные различными примесями, идентичны друг другу, равно как идентичны друг другу спектры образцов $TlInS_2$. Из этого следует вывод, что тип легирующей примеси в вышеобозначенных концентрациях не оказывает влияния на характер и форму линий спектров КРС.

- В спектрах КРС кристаллов $TlGaSe_2$, легированных бором (1%), при возбуждении с торцевой стороны обнаружена полоса 160 см^{-1} , не описанная в литературе, интенсивность которой определяется поляризацией возбуждающего излучения.

- Исследования температурной трансформации спектров КРС не дало скачкообразных изменений в поведении интенсивности или ширины линий в ходе изменения температуры, что могло бы свидетельствовать о прохождении через точки фазовых переходов. Такой результат согласуется с анализом литературных данных, где нет однозначных указаний на проявление фазовых переходов в спектрах КРС.

- Обнаружено существование фотоиндуцированного структурного фазового перехода в диапазоне температур 140–160 К. Образовавшаяся фаза не является полным аналогом обычной несоответствующей фазы, поскольку последовавшее от 160 К глубокое охлаждение не привело к переходу этой фазы в низкотемпературную несоответствующую фазу, и только нагрев до комнатной температуры привел к ее ликвидации.

Список литературы

1. *Panich A. M.* Electronic properties and phase transitions in low-dimensional semiconductors // *J. Phys. : Condens. Matter.* 2008. Vol. 20, № 6. P. 3–31.
2. *Hanias M, Anagnostopoulos A. N., Kambas K., Spyridelis J.* Electrical and Optical properties of as-grown $TlInS_2$, $TlGaSe_2$ and $TlGaS_2$ single crystals // *J. Mater. Res. Bull.* 1992. Vol. 27. P. 25–38.
3. *Allakhverdiev K. R., Mammadov T. G., Suleymanov R. A., Gasanov N. Z.* Deformation effects in electronic spectra of the layered semiconductors $TlGaS_2$, $TlGaSe_2$ and $TlInS_2$ // *J. Phys. : Condens. Matter.* 2003. Vol. 15. P. 1291–1298.
4. *Лодиз Р.* Рост кристаллов. М. : Мир, 1974. 540 с.
5. *Тауц Я.* Оптические свойства полупроводников. М. : Мир, 1967. 74 с.
6. *Gürbulak Bekir, Yildirim Muhammet, Ateş Aytunç, Tüzemen Sehabattin, Yoğurtçu Yahya Kemal.* The Absorption



- Properties of p-Type $\text{TlIn}_x\text{Ga}(1-x)\text{Se}_2$ and TlGaSe_2 // Turk. J. Phys. 2000. Vol. 24. P. 49–61.
7. Керимова Э. М., Пашаев А. М. Воздействие внешних факторов на физические свойства низкоразмерных полупроводниковых соединений типа $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}^6_2$ и твердых растворов на их основе, включающих переходные металлы и редкоземельные элементы // Материалы Международной конференции «Физика-2005»: сб. тр. Баку, 2005. № 232. С. 872–874.
 8. Сардарлы Р. М., Самедов О. А., Садыхов И. Ш., Зейналова Э. А., Сардарлы Т. Ю. Сегнетоэлектрические и электрические свойства интеркалированных Ag кристаллов TlInS_2 // Материалы Международной конференции «Физика-2005»: сб. тр. Баку, 2005. № 232. С. 396–400.
 9. Сардарлы Р. М. Колебательные спектры соединений A^3B^3 и $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}^6_2$. Баку: Элм, 2004. 225 с.
 10. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32, № 1. С. 3–18.
 11. Gasanly N. M., Goncharov A. F., Melnik N. N., Ragimov A. S., Tagirov V. I. Optical Phonons and Structure of TlGaSe_2 , TlGaS_2 , and TlInS_2 Layer Single Crystals // Phys. Stat. Sol. (b). 1983. Vol. 116, iss. 2. P. 427–443.
 12. Korolik O. V., Kaabi S. A. D., Gulbinas K., Mazanik N. V., Drozdov N. A., Grivickas V. Band edge photoluminescence of undoped and doped TlInS_2 layered crystals // Journal of Luminescence. 2017. Vol. 187. P. 507–512.
 13. Paucar Raul, Harada Kazuki, Matsumoto Ryoya, Wakita Kazuki, Shim Yong Gu, Alekperov Oktay, Mamedov Nazim. Phase transition and Raman-active modes in TlInS_2 // Phys. Stat. Sol. (c). 2013. Vol. 10, № 8. P. 1132–1135. DOI: 10.1002/pssc.201200868
 14. Либерман А. Б., Царевский С. С., Зюзин Н. А. Фотоиндуцированный структурный переход в монокристалле $\text{Pb}_{0.2}\text{Sn}_{0.8}\text{S}$ // Физика твердого тела. 1996. Т. 38, № 5. С. 1596–1597.

Образец для цитирования:

Кааби С. А. Д., Дроздов Н. А., Королик О. В. Оптическое поглощение и комбинационное рассеяние света в легированных кристаллах TlGaSe_2 и TlInS_2 // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 112–122. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-112-122.

Optical Absorption and Raman Scattering in Doped Crystals TlGaSe_2 and TlInS_2

S. A. D. Kaabi, N. A. Drozdov, O. V. Korolek

Sabah Abed Daud Kaabi, ORCID 0000-0002-1376-7628, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, sabah.2011@mail.ru

Nikolay A. Drozdov, ORCID 0000-0001-9957-5928, Belarusian State University, 4, Nezalezhnastsi Ave., Minsk, 220030, Belarus, drozdov@bsu.by

Olga V. Korolek, ORCID0000-0001-9430-4010, Belarusian State University, 4, Nezalezhnastsi Ave., Minsk, 220030, Belarus, olga_zinchuk@tut.by

Background and Objectives. The TlGaSe_2 and TlInS_2 monocrystals are the $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}^6_2$ type ternary semiconductor compounds. Studies of TlGaSe_2 and TlInS_2 materials are carried out quite intensively due to the uniqueness of their optical and electrophysical properties and significant prospects for their practical use. At the same time, information about the effect of specific doping impurities on the properties of such materials is insufficient and often contradictory. Thus, the purpose of this paper was to establish the influence of doping Ag, Al, B, Er, Fe, Nd, Tb impurities in concentrations from 0.1 to 3% on the optical absorption and Raman scattering of light in the TlGaSe_2 and TlInS_2 crystals. **Materials and Methods:** Crystals of semiconductor ferroelectrics TlGaSe_2 and TlInS_2 , doped with Ag, Al, B, Er, Fe, Nd, Tb at concentrations from 0.1 to 3%, were studied to establish the features of the impurities doping influence on the optical absorption and Raman scattering in the tested crystals. The absorption measurements were carried

out by measuring the light transmission and reflection spectra and next calculating the band gap by the Tauc method. Raman spectra were measured with the confocal spectrometer. Solid-state lasers operating at wavelengths of 473 and 532 nm were used as an excitation source. The size of the light spot on the sample was $\sim 1 \mu\text{m}$. The backscattered light was detected by a deeply cooled silicon CCD array with a resolution of at least 1 cm^{-1} . **Results:** The measurements of transmittance and reflection spectra of the TlGaSe_2 and TlInS_2 samples and the calculation of the band gap E_g have shown that when the crystals were the doped with the impurities indicated quantities, the values of E_g , known from the literature data for undoped materials, were retained. These results are confirmed by the Raman scattering data in the temperature range 21.5–300 K.

Key words: ferroelectric semiconductors, TlGaSe_2 , TlInS_2 , band gap, optical absorption, optical transmission, Raman scattering, impurity, temperature dependence.

Reference

1. Panich A. M. Electronic properties and phase transitions in low-dimensional semiconductors. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2008, vol. 20, no. 6, pp. 3–31.
2. Haniyas M., Anagnostopoulos A. N., Kambas K., Spyridelis J. Electrical and optical properties of as-grown TlInS_2 , TlGaSe_2 and TlGaS_2 single crystals. *J. Mater. Res. Bull.*, 1992, vol. 27, pp. 25–38.
3. Allakhverdiev K. R., Mammadov T. G., Suleymanov R. A., Gasanov N. Z. Deformation effects in electronic spectra of the layered semiconductors TlGaS_2 , TlGaSe_2 and TlInS_2 . *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2003, vol. 15, pp. 1291–1298.



4. Lodiz P. *Rost kristallov* [The Growth of Single Crystals]. Moscow, Mir Publ., 1974. 540 p. (in Russian).
5. Tautz Ya. *Opticheskie svoistva poluprovodnikov* [Optical properties of semiconductors]. Moscow, Mir Publ., 1967. 74 p. (in Russian).
6. Gürbulak Bekir, Yildirim Muhammet, Ateş Aytunç, Tüzenmen Sehabattin, Yoğurtçu Yahya Kemal. The Absorption Properties of p-Type TlIn_xGa(1-x)Se₂ and TlGaSe₂. *Turk. J. Phys.*, 2000, vol. 24, pp. 49–61.
7. Kerimova E. M., Pashaev A. M. *Vozdeistvie vneshnikh faktorov na fizicheskie svoistva nizkorazmernykh poluprovodnikovykh soedinenii tipa A³B³C⁶₂ i tverdykh rastvorov na ikh osnove, vkluchaiushchikh perekhodnye metally i redkozemel'nye elementy* [The effect of external factors on the physical properties of low-dimensional semiconductor compounds such as A³B³C⁶₂ and solid solutions based on them, including transition metals and rare earth elements]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Fizika-2005"* [Proceedings of the International Conference of "Physics-2005"]. Baku, 2005, no. 232, pp. 872–874 (in Russian).
8. Sardarly R. M., Samedov O. A., Sadykhov I. Sh., Zeynalova E. A., Sardarly T. Yu. Segnetoelektricheskie i elektricheskie svoistva interkalirovannykh Ag kristallov TlInS₂ [Ferroelectric and electrical properties of intercalated Ag crystals of TlInS₂]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Fizika-2005"* [Proceedings of the International Conference of "Physics-2005"]. Baku, 2005, no. 232, pp. 396–400 (in Russian).
9. Sardarly R. M. Kolebatel'nye spektry soedinenii A³B³ i A³B³C⁶₂ [Vibration spectrum of the A³B³ and A³B³C⁶₂ compounds]. Baku, ELM Publ., 2004. 225 p. (in Russian).
10. Alferov Zh. I. Istorii i budushchee poluprovodnikovykh geterostruktur [The history and future of semiconductor heterostructures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 1998, vol. 32, no. 1, pp. 3–18 (in Russian).
11. Gasanly N. M., Goncharov A. F., Melnik N. N., Ragimov A. S., Tagirov V. I. Optical Phonons and Structure of TlGaSe₂, TlGaS₂, and TlInS₂ Layer Single Crystals. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 1983, vol. 116, iss. 2, pp. 427–443.
12. Korolik O. V., Kaabi S. A. D., Gulbinas K., Mazanik N. V., Drozdov N. A., Grivickas V. Band edge photoluminescence of undoped and doped TlInS₂ layered crystals. *J. of Luminescence*, 2017, vol. 187, pp. 507–512.
13. Paucar Raul, Harada Kazuki, Matsumoto Ryoya, Wakita Kazuki, Shim Yong Gu, Alekperov Oktay, Mamedov Nazim. Phase transition and Raman-active modes in TlInS₂. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2013, vol. 10, no. 8, pp. 1132–1135. DOI 10.1002/pssc.201200868
14. Liberman A. B., Tsarevskii S. S., Zyuzin N. A. Photo-induced structural transition in a single crystal of Pb_{0.2}Sn_{0.8}S. *Physics of the Solid State*, 1996, vol. 38, no. 5, pp. 878–879.

Cite this article as:

Sabah A. D. Kaabi, Drozdov N. A., Korolek O. V. Optical Absorption and Raman Scattering in Doped Crystals TlGaSe₂ and TlInS₂. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 112–122 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-112-122.



БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

УДК 535.41

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ GB-СПЕКЛОВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ РАССЕЯНИИ СВЕТА НА ВИРТУАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ НУКЛЕОТИДНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ГЕНОВ ЭНТЕРОБАКТЕРИЙ

С. С. Ульянов, О. В. Ульянова, С. С. Зайцев,
М. А. Хижнякова, Ю. В. Салтыков, Н. Н. Филонова,
И. А. Субботина, А. М. Ляпина, В. А. Федорова

Ульянов Сергей Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове, prof.serгей.ulyanov@outlook.com

Ульянова Онега Владимировна, кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове, ulianovaov@mail.ru

Зайцев Сергей Сергеевич, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове, zaytsev-sergey@inbox.ru

Хижнякова Мария Александровна, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове, khizhnyakova_mariya@mail.ru

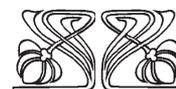
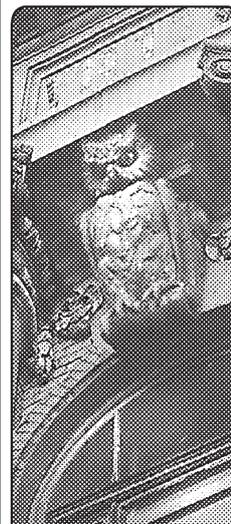
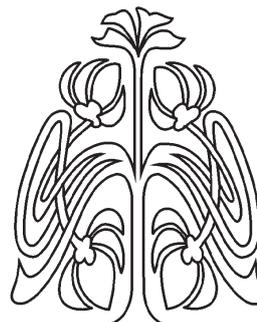
Салтыков Юрий Владимирович, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове; аспирант кафедры микробиологии, биотехнологии и химии, Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова, saltykov3443@mail.ru

Филонова Надежда Николаевна, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове; магистрант кафедры микробиологии, биотехнологии и химии, Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова, nadejda.filonova@yandex.ru

Субботина Ирина Анатольевна, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове; магистрант кафедры микробиологии, биотехнологии и химии, Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова, subbotina.irinaa@mail.ru

Ляпина Анна Михайловна, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове, lyapina_anna@inbox.ru

Федорова Валентина Анатольевна, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии, филиал в Саратове; профессор кафедры микробиологии, биотехнологии и химии, Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова, feodorovav@mail.ru



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Представлен краткий обзор методов современной биоинформатики, основанных на использовании виртуальных оптических GB-спекл-полей (gene-based speckles) и анализе их статистических характеристик. Предложен и обсужден алгоритм преобразования нуклеотидной последовательности в двумерную GB-спекл-структуру. Проведено моделирование процессов формирования GB-спекл-структур при рассеянии когерентного света на квази-случайных поверхностях, соответствующих исходным нуклеотидным последовательностям генов, кодирующих белки семейства Omp_{tin} (*SopA*, *OmpP*, *OmpT*, *PgtE* и *Pla*) энтеробактерий. Исследованы статистические свойства GB-спеклов. Показана возможность выявления наличия общих мотивов указанных генов с использованием методов оптики спеклов.

Ключевые слова: последовательности нуклеотидов, GB-спеклы, референтная последовательность, дифракция когерентного света, SNP, виртуальные случайные поверхности, белки Omp_{tin}, ген.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-123-137

Введение

Как известно, нуклеиновые кислоты (ДНК или РНК) хранят и передают генетическую информацию в живых организмах. Структурной и функциональной единицей наследственной информации является ген. Ген представляет собой последовательность нуклеотидов в молекуле нуклеиновых кислот. Молекулы ДНК состоят из четырех типов нуклеотидов. Эти нуклеотиды содержат соответственно четыре азотистых основания, а именно аденин (А), тимин (Т), гуанин (G) и цитозин (С).

Нуклеотидную последовательность можно определить, используя специальную процедуру секвенирования [1, 2], которая позволяет представить первичную структуру макромолекулы в виде линейной последовательности мономеров в текстовом формате.

Любая произвольная последовательность нуклеотидов может быть искусственно синтезирована даже в том случае, если такая последовательность ранее не существовала в природе. Этот уникальный подход был разработан в пионерских исследованиях, которые недавно были проведены в корпорации Microsoft (подразделение Microsoft Research) совместно с университетом Вашингтона (Washington University) [3, 4].

Упомянутые исследования, посвященные записи цифровой информации с использованием нуклеотидных последовательностей, чрезвычайно важны с точки зрения долговременного хранения больших баз данных. По мнению экспертов [5], в настоящее время возникла серьезная угроза возникновения кризиса хране-

ния данных. Так, например, объем созданных в 2013 г. данных составил 3.5 ZB (1 ZB = 10²¹ байт), при этом 92% от объема всей существующей информации было сгенерировано только лишь в 2012–2013 гг. Информации о величине объемов данных, сгенерированных с 2014 г. по настоящее время, не было обнаружено авторами в открытых источниках. Ожидается [5], что к 2020 г. будет сгенерировано 40 ZB информации, обеспечить хранение которой будет в принципе невозможно, используя существующие к настоящему времени носители. Однако эта проблема может быть достаточно эффективно решена при хранении данных на ДНК-носителях. Использование ДНК для хранения информации позволяет достичь плотности хранения информации на уровне 10⁹ GB/мм³ при тысячелетних сроках хранения [4]. Так, сотрудники компании Майкрософт совместно с учеными из Вашингтонского университета сохранили в форме нуклеиновой кислоты более 200 мегабайт данных [6–10]. В частности, в запись вошли некоторые оцифрованные произведения искусства, 100 величайших литературных произведений из проекта «Гутенберг», Всеобщая декларация прав человека ООН более чем на 100 языках, база данных семян некоммерческой организации Crop Trust и клип This Too Shall Pass группы OK GO в высоком разрешении [11]. Как отмечалось в статье [10], предложенный алгоритм кодирования цифровых данных на ДНК носителе является достаточно быстродействующим, а частота появления ошибок восстановления числовых данных из нуклеотидных последовательностей весьма невелика [9].

Следует отметить, что параллельно с корпорацией Майкрософт исследования в области кодирования информации проводятся в ряде других групп. Так, ранее, в 2012 г., исследователи из Гарвардской медицинской школы зашифровали [12] полный текст книги *Regenesis: How Synthetic Biology Will Reinvent Nature and Ourselves* и сохранили его на ДНК-носителях [13]. Позднее, в 2013 г., сотрудники Европейского института биоинформатики (the European Bioinformatics Institute) сохранили несколько изображений звуковых и текстовых файлов, включая 26-секундный аудиоклип, содержащий речь Мартина Лютера Кинга «I Have a Dream». Успешная попытка сохранить на ДНК-носителе 22 МБ информации (а именно был записан немой фильм *Trip to the Moon*) и восстановить эти данные обратно в числовой формат была детально описана в статье [14].



Однако подлинный прогресс был достигнут в недавних исследованиях, опубликованных в работе [15]. Видеопоток, содержащий последовательность из пяти изображений скачущей лошади, был заархивирован в геноме живых бактерий, сохраняющих способность к размножению.

Уместно также упомянуть работы [16–19], имеющие прямое отношение к проблеме кодирования числовых данных с использованием генетических носителей информации.

В определенной степени обратная задача (а именно преобразование первичных генетических данных в числовой формат с последующей регистрацией этих данных на физическом носителе) также является чрезвычайно актуальной и перспективной. Актуальность проблемы состоит в том, что для нахождения одинаковых или идентичных фрагментов в нуклеотидной последовательности двух разных сравниваемых между собой генов требуется их последовательная обработка несколькими специальными компьютерными программами. Это занимает довольно продолжительное время и зачастую сопровождается трудностями в трактовке результатов из-за значительного количества (до 20%) ошибок на этапе секвенирования, что в настоящее время решается путем дополнительного неоднократного (иногда до 3–5 раз) ресеквенирования исходной матрицы с повторным многоступенчатым анализом. Очевидно, что используемый алгоритм вызывает неудобства и затрудняет обработку данных даже при работе с небольшими нуклеотидными последовательностями размером 250–500 нуклеотидов. Еще больше проблем возникает при работе с большими последовательностями, даже если это отдельные гены размером 1000–1300 кб, которые не могут быть расшифрованы за одно прочтение, несмотря на доступность большого числа различных стратегий секвенирования протяженных фрагментов ДНК. Многочисленные ошибки прочтения и анализа преодолеваются путем неоднократного прочтения разных фрагментов гена с тем же пакетом многоступенчатых компьютерных вычислений. Понятно, что обработка даже таких больших с точки зрения биоинформатики молекул по сравнению с более короткими в 10–20 раз более трудоемка [20]. Но если нуклеотидная последовательность записывается в аналоговом формате на дифракционном оптическом элементе или на голограмме, то такой искусственный оптический элемент может быть использован при конструировании оптического процессора. Другими словами, использование спеклов может

быть чрезвычайно полезным при оптической обработке нуклеотидных последовательностей в реальном времени, разработке экспресс-методов идентификации микроорганизмов, детекции таргетных генов патогенов и их типирования благодаря высокой скорости обработки данных, отсутствию потребности в последовательном использовании нескольких программ и минимизации или полному отсутствию ошибок. Высокая точность получения результата в полной мере соответствует одному из наиболее приоритетных научных кластеров, связанных с точной медициной (*precise medicine*), нацеленной на создание диагностических устройств нового поколения под условным названием *precise medical devices*. Таким образом, преобразование генетических данных в компьютерные голограммы или представление последовательности нуклеотидов в виде спекл-структуры позволит как значительно усовершенствовать, так и создать инструменты современной биоинформатики и в перспективе методы лабораторной диагностики инфекционных и неинфекционных болезней человека и животных [2].

Тем не менее, по мнению авторов данной статьи, в настоящее время междисциплинарные исследования в области когерентной оптики и молекулярной биологии фактически не проводились. Исключение составляют отдельные работы, посвященные функциональной голографии или геномной голографии (*Functional Holography, Genome Holography* [21]). Однако во избежание недоразумений следует особо подчеркнуть, что термин «голография» использован в статье [21] совершенно некорректно и не имеет абсолютно никакого отношения к оптической голографии.

Ранее авторами данной статьи последовательности нуклеотидов гена *omp1* бактерии *Chlamydia trachomatis* (геновары D, E, F, G, J и K) и бактерии *C. psittaci* были успешно конвертированы в двумерные спекл-поля. В работах [22–24] был введен специальный термин GB-спекл-структуры (*gene-based speckles*) для определения принципиально нового класса спекл-полей. GB-спекл-поля обладают уникальными статистическими свойствами, которые были частично исследованы в работе [23]. Как было показано в статье [22], использование таких методов спекл-оптики, как спекл-коррелометрия, вычитание изображений и спекл-интерферометрия, позволяет определить наличие природных мутаций в сравниваемых штаммах даже в случае минимальных различий всего в один нуклеотид



(SNP, single nucleotide polymorphism). При этом показано, что появление некоторых типов мутаций (в частности, делеций [2]) ведет к формированию полос в интерференционной картине при использовании метода спекл-интерферометрии [22]. В работе [24] проведена оптимизация алгоритма кодирования нуклеотидных последовательностей бактерии *C. trachomatis* в двумерные GB-спекл-поля, показано, что алгоритм, описанный в [22], близок к оптимальному. В статье [25] метод виртуальной спекл-интерферометрии фазового сдвига (4 bucket technique) был использован для исследования полиморфизма у двух вариантов *omp1* гена *C. trachomatis* (а именно штаммов E/Bour (E1 sub-type) и E/IU-4 2 0755u4 (E2 subtype)). Предложенный метод был успешно применен для детектирования гена *omp1* *C. trachomatis* всех известных субтипов, несущих генетические мутации в виде одиночных SNP или их комбинации.

В данной статье с использованием GB-спеклов был проведен анализ нуклеотидных последовательностей генов, кодирующих продукцию сериновых протеаз, белков семейства OmpTin, энтеробактерий – возбудителей таких актуальных инфекций, как сальмонеллез, иерсиниозы, шигеллез и эшерихиозы [26–28]. Сравнивались последовательности генов *pla* (*Yersinia pestis*), *pgtE* (*Salmonella enterica*), *sopA* (*Shigella flexneri*), *ompT* and *ompP* (*Escherichia coli*). Упомянутые последовательности существенно различаются между собой, но, однако, имеют общие мотивы. Под мотивом (motif) в молекулярной биологии понимается характерная относительно короткая последовательность нуклеотидов в нуклеиновых кислотах или аминокислот в полипептидах, слабо меняющаяся в процессе эволюции и имеющая определенную биологическую функцию [29]. Существование общих мотивов у последовательностей белков семейства OmpTin с гомологией 40–78% была доказана на основе структурных исследований, результаты которых были ранее опубликованы в работе [30]. Недавно в результате молекулярного картирования модельного белка группы OmpTin нами было продемонстрировано наличие у последних общих антигенных детерминант, имеющих потенциально диагностическое значение [31]. Показано, что экспериментальный вариант ТИФА – модификация пептидного ELISA на основе общих маркерных пептидов белков OmpTin, может быть использован для ретроспективной диагностики инфекционных заболеваний, вы-

званных энтеропатогенными бактериальными агентами. В данной статье сходства у упомянутых последовательностей были подтверждены на основе сопоставления статистических характеристик сгенерированных GB-спеклов.

1. Преобразование последовательности нуклеотидов в спекл-структуру

На первом этапе последовательность букв из исходной одномерной нуклеотидной последовательности преобразуется в последовательность чисел в соответствии со следующим правилом [22]:

$$A \rightarrow 1, C \rightarrow 2, G \rightarrow 3, T \rightarrow 4. \quad (1)$$

Важно подчеркнуть, что, как было показано в работе [24], взаимосвязь букв и чисел в данном случае не является принципиальной. Иными словами, при кодировании могло быть использовано любое другое правило, например:

$$T \rightarrow 1, G \rightarrow 2, C \rightarrow 3, A \rightarrow 4. \quad (2)$$

На втором этапе генерируются все возможные комбинации (триады), содержащие лишь три числа из исходного полного набора из всех четырех чисел {1, 2, 3, 4}.

В результате формируется полный набор всех триад:

$$(1\ 1\ 1), (1\ 1\ 2), (1\ 1\ 3), (1\ 1\ 4), (1\ 2\ 1), (1\ 2\ 2), \\ (1\ 2\ 3), (1\ 2\ 4), (1\ 3\ 1), \dots, (4\ 4\ 4).$$

Число всех возможных комбинаций из четырех чисел, объединенных в триады, равно 64.

Затем на следующем (третьем) этапе некоторая дискретная величина h приписывается каждой триаде в соответствии с несложным алгоритмом, описанным в статье [22]. Упомянутый алгоритм был реализован на Matlab R2015a.

Величина h является целым числом, варьирующемся в интервале от 1 до 64. При этом каждая триада из исходной нуклеотидной последовательности ассоциируется только с одним значением h . Так, например, комбинация (1 1 1) соответствует величине $h=1$, (1 1 2) соответствует $h=2$, (1 1 3) соответствует $h=3$, (1 1 4) соответствует $h=4$, (1 2 1) соответствует $h=5$, (1 2 2) соответствует $h=6$ и так далее. Окончательно последняя комбинация (4 4 4) соответствует величине $h=64$.

На четвертом этапе из одномерного массива h формируется квадратная матрица $H_{n,m}$.

Физический смысл сформированной матрицы H состоит в том, что каждый ее элемент представляет собой локальную высоту некоей виртуальной шероховатой последовательности, соответствующей локальному содержанию ана-



лизируемой генетической структуры. Полученные виртуальные шероховатые поверхности будут использованы для моделирования уникальных спекл-структур, соответствующих различным специфическим нуклеотидным последовательностям.

Двумерное спекл-поле, соответствующее каждой конкретной нуклеотидной поверхности, генерируется с использованием дифракции когерентного пучка с профилем квадратного сечения на виртуальной рассеивающей поверхности с микрорельефом, описываемым матрицей $H_{n,m}$.

Как уже упоминалось, $H_{n,m}$ задает высоты шероховатости поверхности. В каждой точке виртуального диффузора (в плоскости рассеяния пучка) вводится некоторая фазовая модуляция $U_{n,m} = \exp(-2\pi i H_{n,m}/64)$. Поверхность освещается при нормальном падении пучка, фаза в освещающем пучке является постоянной величиной.

Процедура перекодирования исходной нуклеотидной последовательности в GB-спекл-структуру на примере гена *pla Y. pestis*, экспрессирующего продукцию *Pla* протеазы – типичного представителя семейства белков *Omptin* энтеробактерий [30], приведена ниже.

Исходная нуклеотидная последовательность *pla* (номер доступа в GenBank: AL109969.1) выглядит следующим образом:

ATGAAGAAAAGTTCTATTGTGGCAAC
 CATTATAACTATTCTGTCCGGGAGTGC
 TAATGCAGCATCATCTCAGTTAATAC
 CAAATATATCCCCTGACAGCTTTACAGTT
 GCAGCCTCCACCGGGATGCTGAGTG
 GAAAGTCTCATGAAATGCTTTATGACG
 CAGAAACAGGAAGAAAGATCAGCCAGT
 TAGACTGGAAGATCAAAAATGTCGCTATCCT
 GAAAGGTGATATATCCTGGGATCCATACT
 CATTTCTGACCCTGAATGCCAGGGGGTG
 GACGTCTCTGGCTTCCGGGTCAGGTAATATG
 GATGACTACGACTGGATGAATGAAAAT
 CAATCTGAGTGGACAGATCACTCATCT
 CATCCTGCTACAAATGTTAATCATGCCAAT
 GAATATGACCTCAATGTGAAAGGCTGGT
 TACTCCAGGATGAGAATTATAAAGCAG
 GTATAACAGCAGGATATCAGGAAACAC
 GTTTCAGTTGGACAGCTACAGGTG
 GTTCATATAGTTATAATAATGGAGCTTATAC
 CGGAAACTTCCCGAAAGGAGTGCGGGTA
 ATAGGTTATAACCAGCGCTTTTCTATGC
 CATATATTGGACTTGCAGGCCAGTATCGCAT
 TAATGATTTTGAGTTAAATGCATTTTA
 AATTCAGCGACTGGGTTCGGGCACAT

GATAATGATGAGCACTATATGAGAGATCT
 TACTTTCCGTGAGAAGACATCCGGCTCAC
 GTTATTATGGTACCGTAATTAACGCTGGATAT
 TATGTCACACCTAATGCCAAAGTCTTT
 GCGGAATTTACATACAGTAAATATGAT
 GAGGGCAAAGGAGGTACTCAGACCATT
 GATAAGAATAGTGGAGATTCTGTCTC
 TATTGGCGGAGATGCTGCCGGTATTTTC
 CAATAAAAATTATACTGTGACGGCGGGTCT
 GCAATATCGCTTCTGA

Преобразованная в числовой формат эта же последовательность принимает следующий вид:

1 4 3 1 1 3 1 1 1 1 3 4 4 2 4 1 4 4 3 4 3 3 2 1 1 2 2
 1 4 4 1 4 1 1 2 4 1 4 4 2 4 3 4 2 2 3 3 3 1 3 4 3 2 4
 1 1 4 3 2 1 3 2 1 4 2 1 4 2 4 2 1 3 4 4 1 1 4 1 2 2 1
 1 1 4 1 4 1 4 2 2 2 2 4 3 1 2 1 3 2 4 4 4 1 2 1 3 4 4
 3 2 1 3 2 2 4 2 2 1 2 2 3 3 3 1 4 3 2 4 3 1 3 4 3 3 1
 1 1 3 4 2 4 2 1 4 3 1 1 1 4 3 2 4 4 4 1 4 3 1 2 3 2 1
 3 1 1 1 2 1 3 3 1 1 3 1 1 1 3 1 4 2 1 3 2 2 1 3 4 4 1
 3 1 2 4 3 3 1 1 3 1 4 2 1 1 1 1 4 3 4 2 3 2 4 1 4 2
 2 4 3 1 1 1 3 3 4 3 1 4 1 4 1 4 2 2 4 3 3 3 1 4 2 2 1
 4 1 2 4 2 1 4 4 4 2 4 3 1 2 2 2 4 3 1 1 4 3 2 2 1 3 3
 3 3 3 4 3 3 1 2 3 4 2 4 2 4 3 3 2 4 4 2 2 3 3 3 4 2 1
 3 3 4 1 1 4 1 4 3 3 1 4 3 1 2 4 1 2 3 1 2 4 3 3 1 4 3
 1 1 4 3 1 1 1 1 4 2 1 1 4 2 4 3 1 3 4 3 3 1 2 1 3 1 4
 2 1 2 4 2 1 4 2 4 2 1 4 2 2 4 3 2 4 1 2 1 1 1 4 3 4 4
 1 1 4 2 1 4 3 2 2 1 1 4 3 1 1 4 1 4 3 1 2 2 4 2 1 1 4
 3 4 3 1 1 1 3 3 2 4 3 3 4 4 1 2 4 2 2 1 3 3 1 4 3 1 3
 1 1 4 4 1 4 1 1 1 3 2 1 3 3 4 1 4 1 1 2 1 3 2 1 3 3 1
 4 1 4 2 1 3 3 1 1 1 2 1 2 3 4 4 4 2 1 3 4 4 3 3 1 2 1
 3 2 4 1 2 1 3 3 4 3 3 4 4 2 1 4 1 4 1 3 4 4 1 4 1 1 4
 1 1 4 3 3 1 3 2 4 4 1 4 1 2 2 3 3 1 1 1 2 4 4 2 2 2 3
 1 1 1 3 3 1 3 4 3 2 3 3 3 4 1 1 4 1 3 3 4 4 1 4 1 1 2
 2 1 3 2 3 2 4 4 4 4 2 4 1 4 3 2 2 1 4 1 4 1 4 4 3 3 1
 2 4 4 3 2 1 3 3 2 2 1 3 4 1 4 2 3 2 1 4 4 1 1 4 3 1 4
 4 4 4 3 1 3 4 4 1 1 1 4 3 2 1 4 4 1 4 4 4 1 1 1 4 4 2
 1 3 2 3 1 2 4 3 3 3 4 4 2 3 3 3 2 1 2 1 4 3 1 4 1 1 4
 3 1 4 3 1 3 2 1 2 4 1 4 1 4 3 1 3 1 3 1 4 2 4 4 1 2 4
 4 4 2 2 3 4 3 1 3 1 1 3 1 2 1 4 2 2 3 3 2 4 2 1 2 3 4
 4 1 4 4 1 4 3 3 4 1 2 2 3 4 1 1 4 4 1 1 2 3 2 4 3 3 1
 4 1 4 4 1 4 3 4 2 1 2 1 2 2 4 1 1 4 3 2 2 1 1 1 3 4 2
 4 4 4 3 2 3 3 1 1 4 4 4 1 2 1 4 1 2 1 3 4 1 1 1 4 1 4
 3 1 4 3 1 3 3 3 2 1 1 1 3 3 1 3 3 4 1 2 4 2 1 3 1 2 2
 1 4 4 3 1 4 1 1 3 1 1 4 1 3 4 3 3 1 3 1 4 4 2 4 3 4 2
 4 2 4 1 4 4 3 3 2 3 3 1 3 1 4 3 2 4 3 2 2 3 3 4 1 4 4
 4 2 2 1 1 4 1 1 1 1 1 4 4 1 4 1 2 4 3 4 3 1 2 3 3 2 3
 3 3 4 2 4 3 2 1 1 4 1 4 2 3 2 4 4 2 4 3 1

В результате дифракции когерентного пучка с квадратным сечением формируется GB-спекл-структура (рис. 1).

Двумерное распределение фазы GB-спекл-структуры показано на рис. 2.

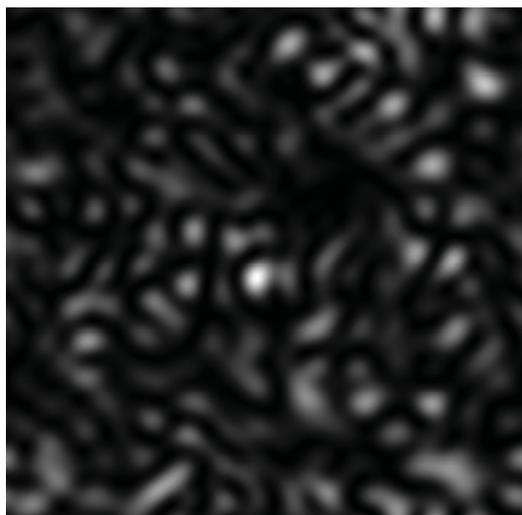


Рис. 1. Характерный вид GB-спекл-структуры (для гена *pla*)

Fig. 1. Typical view of GB-speckles (for *pla* gene)

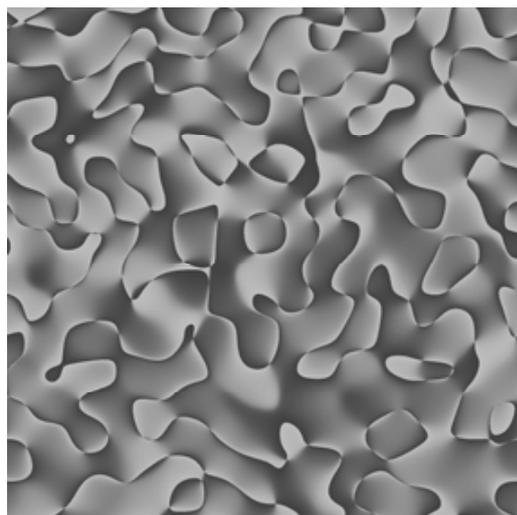


Рис. 2. Характерный вид двумерного распределения фазы GB-спекл-структуры (для гена *pla*)

Fig. 2. Typical view of the 2D phase distribution in GB-speckles (for *pla* gene)

Для сравнения на рис. 3 показана GB-спекл-структура, полученная для *C. trachomatis* геновара D, штамм B120, субтип D1. Аналогичный рисунок был уже опубликован ранее в статье [22], в данной статье он представлен в значительно большем пространственном разрешении (а именно 2048 пикселей на 2048 пикселей).

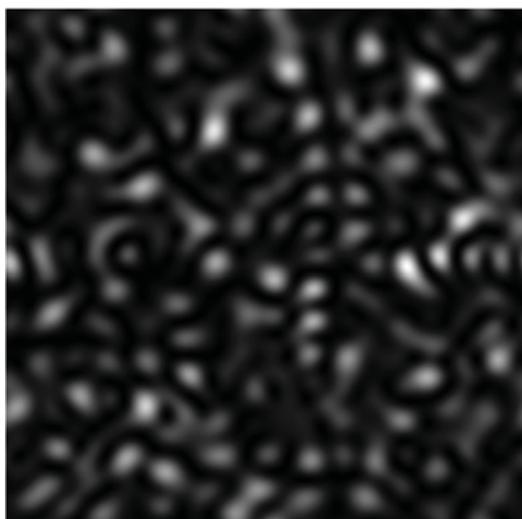


Рис. 3. GB-спекл-структура, вычисленная для *C. trachomatis* геновара D, штамм B-120, субтип D1 [22]

Fig. 3. GB-speckle-structure, computed for *C. trachomatis* genovar D, strain B-120, subtype D1 [22]

Сравнивая спекл-поля, изображенные на рис. 2 и рис. 3, даже без проведения детального статистического анализа, можно сделать заключение о принципиальных структурных различиях между GB-спеклами, полученными для различных генов.

2. Моделирование GB-спекл-структур, формирующихся при рассеянии света на виртуальных квазислучайных поверхностях, полученных для нуклеотидных последовательностей генов, кодирующих биосинтез белков семейства Omp_{tin}

На рис. 4 представлены спекл-структуры, сформированные в результате дифракции лазерного пучка с прямоугольным сечением на виртуальных шероховатых поверхностях, соответствующих генам, экспрессирующим белки *SopA*, *OmpP*, *OmpT* и *PgtE* семейства Omp_{tin}.

Из сравнения рис. 1 и рис. 4, *a-g* видно, что каждому гену (*pla*, *sopA*, *ompP*, *ompT* и *pgtE*) соответствует характерная абсолютно уникальная структура GB-спекл-полей.

Двумерное распределение фазы различных GB-спеклов представлено на рис. 5.

Сопоставление рис. 2 и рис. 5, *a-g* также демонстрирует уникальность фазовой структуры GB-спеклов, соответствующих различным нуклеотидным последовательностям генов *pla*, *sopA*, *ompP*, *ompT* и *pgtE*.

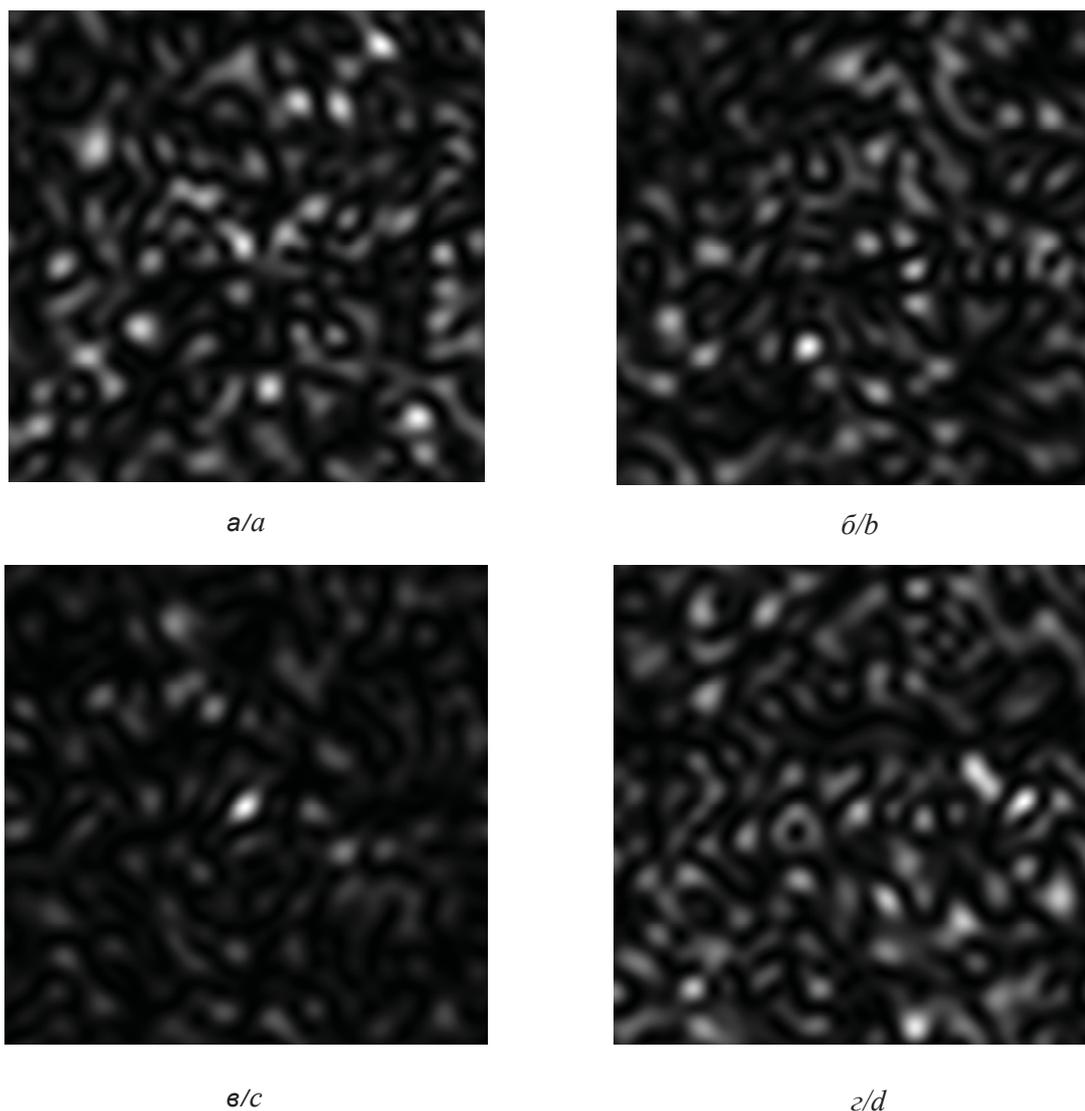


Рис. 4. GB-спеклы, полученные для различных генов, кодирующих белки семейства Omptin: *a* – *SopA*, *б* – *OmpP*, *в* – *OmpT*, *г* – *PgtE*

Fig. 4. GB-speckles, obtained for different genes, which code the enzymes of Omptin family: *a* – *SopA*, *b* – *OmpP*, *c* – *OmpT*, *d* – *PgtE*

3. Статистические свойства GB-спекл-полей

3.1. Функции распределения плотности вероятности флуктуаций интенсивности и фазы GB-спеклов генов, кодирующих белки семейства Omptin

Для сгенерированных GB-спекл-структур, полученных для нуклеотидных последовательностей генов *pla*, *sopA*, *ompP*, *ompT* и *pgtE*, были вычислены выборочные функции распределения плотности вероятности, которые представлены на рис. 6 и рис. 7. На рис. 6 показаны распределения для пространственных флуктуаций интенсивности.

Видно, что формы функций распределения, представленные на рис. 6, близки к экспоненциальным. Гипотеза об экспоненциальности распределений была проверена с использованием критерия χ^2 . Как показывают результаты проверки гипотезы, пространственные флуктуации интенсивности в GB-спекл-полях подчиняются экспоненциальному распределению при уровне значимости $\alpha=0.01$ для всех типов исследуемых нуклеотидных последовательностей белков семейства Omptin.

На рис. 7 представлены функции распределения плотности вероятности пространственных флуктуаций фазы в GB-спеклах.

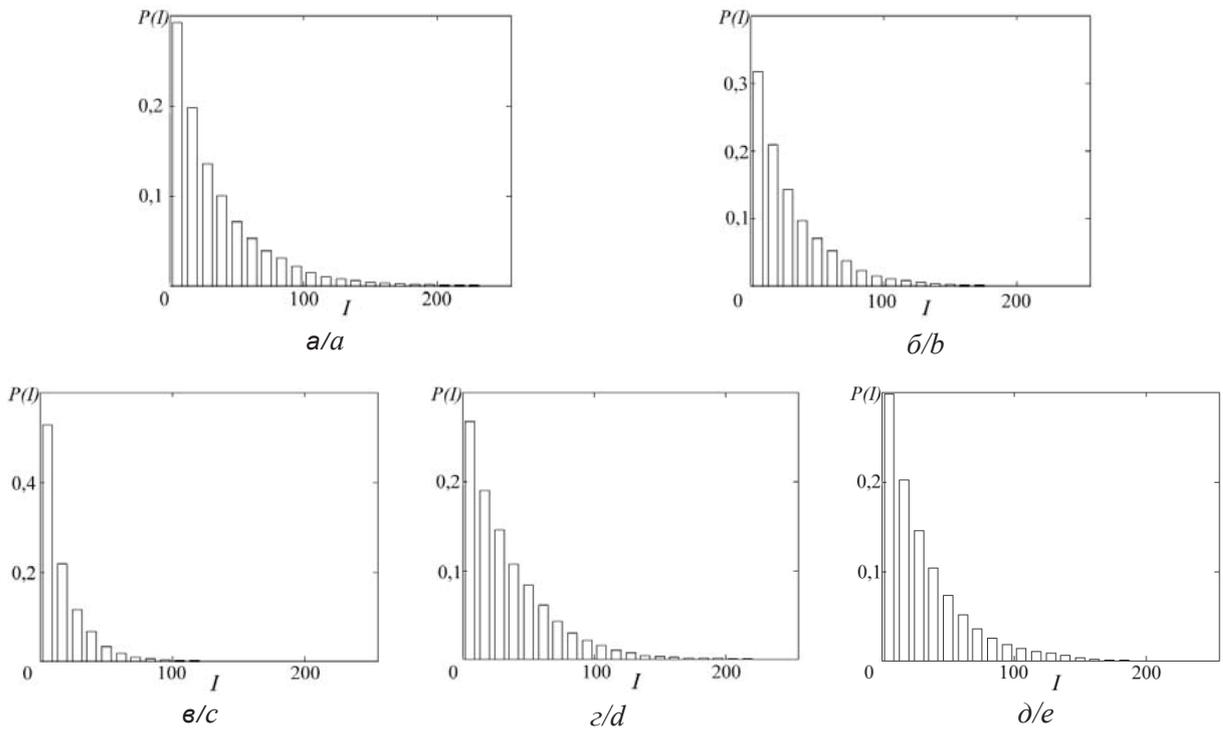


Рис. 6. Функции распределения плотности вероятности пространственных флуктуаций интенсивности GB-спеклов, полученных для последовательностей генов *pla* (а), *sopA* (б), *ompP* (в), *ompT* (г) и *pgtE* (д)

Fig. 6. Probability density functions of spatial fluctuations of the intensity in GB-speckles, obtained for gene sequences *pla* (a), *sopA* (b), *ompP* (c), *ompT* (d), and *pgtE* (e)

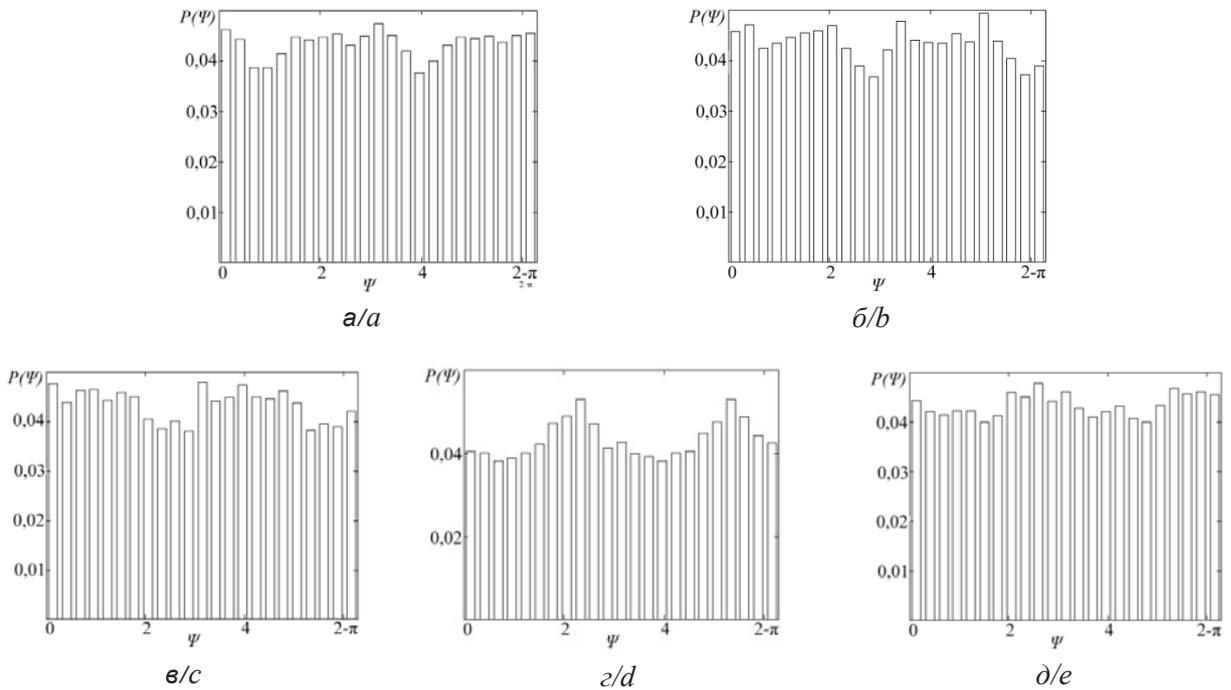


Рис. 7. Функции распределения плотности вероятности пространственных флуктуаций фазы в GB-спекл-полях, полученных для последовательностей генов *pla* (а), *sopA* (б), *ompP* (в), *ompT* (г) и *pgtE* (д)

Fig. 7. Probability density functions of spatial fluctuations of the phase in GB-speckles, obtained for gene sequences *pla* (a), *sopA* (b), *ompP* (c), *ompT* (d) and *pgtE* (e)



корреляционный анализ. Как показывают результаты статистических исследований, величина коэффициента кросс-корреляции (для пространственного распределения интенсивности в сопоставляемых спекл-структурах) лежит в интервале $[-3.92 \times 10^{-3}; 0.039]$, среднее значение коэффициента кросс-корреляции равно 0.123 при среднем квадратическом отклонении, равном 0.015. Исследования пространственного распределения фазы в спекл-структуре показывают, что величина коэффициента кросс-корреляции фазы в сравниваемых спекл-полях лежит в диапазоне $[-0.011; 0.462]$, среднее значение коэффициента кросс-корреляции фазы равно 0.12, при среднем значении среднеквадратического отклонения коэффициента кросс-корреляции фазы, равного 0.153. То есть корреляция между GB-спекл-структурами и соответствующими генами, имеющими общие мотивы, крайне мала.

Еще одной важной характеристикой, определяющей меру сходства двух сравниваемых двумерных полей, является расстояние Хэмминга (см., например, [35]).

В данной статье используется величина, являющаяся аналогом расстояния Хемминга, вычисляемая по следующей формуле:

$$HD = \frac{M(I_{i,j} \neq I_{2(i,j)})}{M_{total}}, \quad (3)$$

где $I_{i,j}$ и $I_{2(i,j)}$ – интенсивности в двух сравниваемых спекл-структурах; i и j – номера строки и ряда для каждого пикселя спекл-структуры; M – количество пикселей, в которых значения интенсивности в первом спекл-поле в точности совпадает со значением интенсивности во втором спекл-поле (т.е. $I_{i,j} = I_{2(i,j)}$); M_{total} – полное количество пикселей в каждой спекл-структуре. В рассматриваемом случае M_{total} всегда равно 4.192×10^6 . Очевидно, что при абсолютной схожести сравниваемых двумерных полей HD принимает максимально возможное значение, равное 1. Если интенсивность света в сопоставляемых полях не имеет одинаковых значений ни в одной точке, то $HD = 0$.

Как показывают результаты компьютерных вычислений, величина HD для пространственного распределения интенсивности в спекл-структуре лежит в интервале $[0.014; 0.021]$, среднее значение $\langle HD \rangle$ равно 0.018 при среднем квадратическом отклонении HD , равном 2.6×10^{-3} . Исследования пространственного распределения фазы в спекл-структуре показывают, что величина HD для

сопоставляемых спекл-полей распределена в диапазоне $[3.721 \times 10^{-3}; 0.013]$, среднее значение HD равно 5.993×10^{-3} при среднем квадратическом отклонении HD , равном 2.608×10^{-3} .

Однако, если в качестве референтной последовательности взять GB-спекл-структуру, соответствующую генетической последовательности гена *omp1* *S. trachomatis*, то значения HD будут лежать в интервале $[0.014; 0.019]$ при среднем значении $\langle HD \rangle = 0.016$ и среднеквадратическом отклонении, равном 1.72×10^{-3} . Это, в свою очередь, свидетельствует о том, что столь малые величины HD появляются также и при сопоставлении GB-спекл-структур для генов, не имеющих общих мотивов.

Это означает, что, несмотря на доказанное существование общих мотивов у сравниваемых нуклеотидных последовательностей генов, кодирующих белки Omp1in, построенные на их основе спекл-поля являются совершенно несхожими по своей структуре. Степень схожести GB-спеклов для генов, имеющих общие мотивы, и для генов, не имеющих общих мотивов, одинакова мала.

4. Выявление наличия общих мотивов у генов *sopA*, *ompP*, *ompT* и *pgtE* методами оптики спеклов

Проведенный в парагр. 3 анализ показывает, что использование классических методов статистики первого и второго порядка является малоэффективным с точки зрения выявления характерных особенностей GB-спекл-структур, соответствующих различным нуклеотидным последовательностям, имеющим общие мотивы. Однако существование общих мотивов в GB-спеклах может быть выявлено чрезвычайно легко при сопоставлении функций распределения плотности вероятности. При этом информативной характеристикой является следующая величина:

$$DFR(I) = P1(I) - P2(I), \quad (4)$$

где $P1(I)$ и $P2(I)$ – по-прежнему функции распределения плотности вероятности флуктуаций интенсивности в сравниваемых спекл-полях.

Следует, однако, отметить важную особенность вычисления величины DFR . Если при построении гистограмм, приведенных на рис. 6, 7, число интервалов в ранжированном интервальном ряду вычислялось в соответствии с формулой Стержесса [36] и полагалось равным 23, то число интервалов N в формуле (4) принимало значительно большее значение. В проведенных исследованиях N было равно



2048 для спекл-структур, содержащих 2048 пикселей \times 2048 пикселей. Разностные значения для сопоставляемых функций распределения плотности вероятностей (функция $DFR(I)$) при большом количестве интервалов показано на рис. 8. Видно, что поведение функции $DFR(I)$

носит монотонный характер и имеется только один ноль функции. Появление нуля функции $DFR(I)$ свидетельствует о существовании общих мотивов в сопоставляемых нуклеотидных последовательностях, на которых были построены GB-спекл-поля.

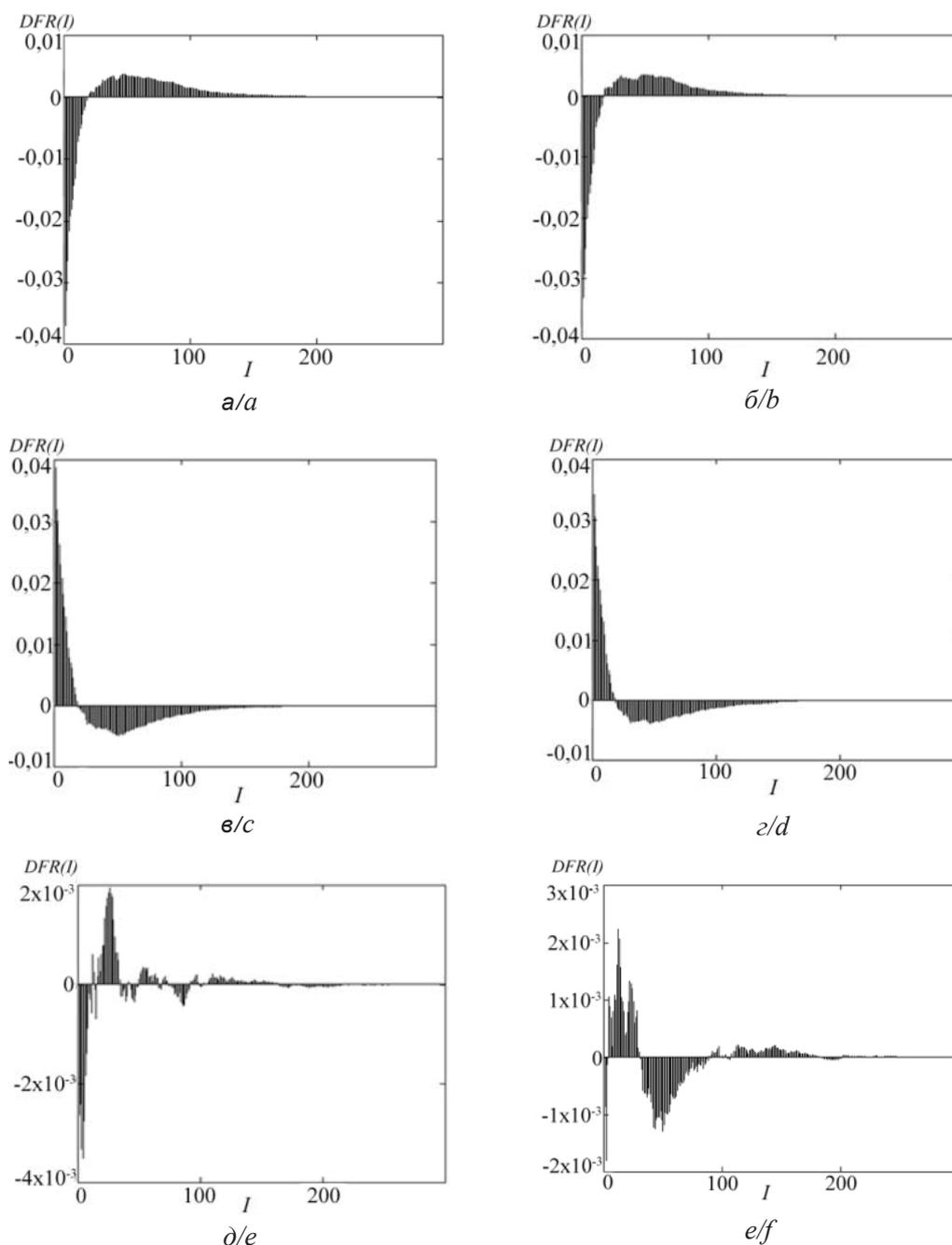


Рис. 8. График функции $DFR(I)$ для различных GB-спектров отдельных пар нуклеотидных последовательностей генов: а – *sopA-ompT*, б – *ompP-ompT*, в – *ompT-pgtE*, г – *ompT-pla*, д – *sopA-omp1 C. trachomatis*, е – *pgtE-omp1 C. trachomatis*

Fig. 8. Plot of function $DFR(I)$ for different GB-speckles of separate pairs of nucleotide gene sequences: а – *sopA-ompT*, б – *ompP-ompT*, в – *ompT-pgtE*, д – *ompT-pla*, е – *sopA-omp1 C. trachomatis*, ф – *pgtE-omp1 C. trachomatis*



Принципиально важным является то обстоятельство, что нули у функции $DFR(I)$ не появляются для GB-спеклов, полученных для последовательностей нуклеотидов, не имеющих общих мотивов. Так, на рис. 8, *д* и рис. 8, *е* показана функция $DFR(I)$ для спеклов, полученных для случая сопоставления генов *omp1 C. trachomatis* и *sopA* (рис. 8, *д*), а также *omp1 C. trachomatis* и *pgtE* (рис. 8, *е*) соответственно. Детальный анализ показывает, что для данного случая (см. рис. 8, *д*, рис. 8, *е*) функция $DFR(I)$ может принимать малые значения, но никогда не обращается в ноль и при этом носит немонотонный (и даже случайный) характер.

Заключение

В данной работе проведен статистический анализ GB-спекл-структур, соответствующих различным последовательностям генов, кодирующих биосинтез белков семейства Omptin. Показано, что данные спекл-поля являются гауссовыми. Установлено, что классические методы статистического анализа GB-спеклов являются неинформативными и малоэффективными с точки зрения выявления сходных фрагментов в исходных нуклеотидных последовательностях. Однако прямое сравнение функций распределения плотности вероятностей пространственных флуктуаций интенсивности спеклов позволяет достоверно выявлять общие мотивы сравниваемых генов. Критерием наличия общих мотивов является появление нуля функции $DFR(I)$ и ее монотонный характер поведения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ПФНИ РАН по направлению 160, тема № 0615-2018-0001 на 2018 год.

Список литературы

1. Sintchenko V., Roper M. P. Pathogen genome bioinformatics // *Methods in Molecular Biology*. 2014. Vol. 1168. P. 173–193.
2. Lesk A. M. Introduction to bioinformatics. Oxford : Oxford University Press, 2002. 314 p.
3. Guo Q., Strauss K., Ceze L., Malvar H. High-density image storage using approximate memory cells // *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*. ASPLOS '16 (Apr 2–6, 2016). Atlanta (US) : IEEE, 2016. P. 413–426. DOI: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2872362.2872413>
4. Bornholt J., Lopez R., Carmean D. M., Ceze L., Seelig G., Strauss K. A DNA-based archival storage system // *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*. ASPLOS '16 (Apr 2–6, 2016). Atlanta (US) : IEEE, 2016. P. 637–649. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2872362.2872397>
5. Rocky Pimentel. Why Data Storage Is Hot Again. URL: <https://www.recode.net/2014/1/10/11622168/stuffed-why-data-storage-is-hot-again-really> (дата обращения: 10.01.2014).
6. Bornholt J., Lopez R., Carmean M. D. Toward a DNA-based archival storage system // *IEEE MICRO*. 2017. Vol. 37, iss. 3. P. 98–104.
7. Bornholt J., Lopez R., Ceze L. A DNA-Based Archival Storage System // *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*. ASPLOS '16 (Apr 2–6, 2016). Atlanta (US) : IEEE, 2016. P. 637–649. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2872362.2872397>
8. Guo Q., Strauss K., Ceze L. High-Density Image Storage Using Approximate Memory Cells. ASPLOS '16. 2016. P. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2872362.2872413>
9. Organick L., Dumas S., Ang S. D., Chen Y.-J., Lopez R. Scaling up DNA data storage and random access retrieval // *BioRxiv*. 2017. Posted March 7. P. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1101/114553>
10. Rashtchian C., Makarychev K., Rácz M. Clustering Billions of Reads for DNA Data Storage // *31st Conference on Neural Information Processing Systems (Dec 4–9, 2017)*. Long Beach (US) : NIPS, 2017. P. 1–12.
11. Клип This Too Shall Pass группы OK Go. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qybUFnY7Y8w> (дата обращения: 1.03.2018).
12. Rojahn S. Y. An Entire Book Written in DNA. URL: <https://www.technologyreview.com/s/428922/an-entire-book-written-in-dna> (дата обращения: 16.08.2012).
13. Church G. M., Gao Y., Kosuri S. Next-Generation Digital Information Storage in DNA // *Science*. 2012. Vol. 337. P. 1628.
14. Blawat M., Gaedke K., Hütter I. Forward Error Correction for DNA Data Storage // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 80. P. 1011–1022.
15. Shipman S. L., Nivala J., Macklis J. D. CRISPR-Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria // *Nature*. 2017. Vol. 547. P. 345–349. DOI: 10.1038/nature23017
16. Goldman N., Bertone P., Chen S., Dessimoz Ch., LeProust E. M., Sipos B., Birney E. Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA // *Nature*. 2013. Vol. 494. P. 77–80. DOI: 10.1038/nature11875
17. Gibson D. G., Glass J. I., Lartigue C., Noskov V. N., Chuang R. Y., Algire M. A., Benders G. A., Montague M. G., Ma L., Moodie M. M., Merryman C., Vashee S.,



- Krishnakumar R., Assad-Garcia N., Andrews-Pfannkoch C., Denisova E. A., Young L., Qi Z. Q., Segall-Shapiro T. H., Calvey C. H., Parmar P. P., Hutchison C. A. 3rd., Smith H. O., Venter J. C.* Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome // *Science*. 2010. Vol. 329. P. 52–56.
18. *Clelland C. T., Risca V., Bancroft C.* Hiding messages in DNA microdots // *Nature*. 1999. Vol. 399. P. 533–534.
19. *Adleman L. M.* Molecular computation of solutions to combinatorial problems // *Science*. 1994. Vol. 266. P. 1021–1024.
20. *Mandel S.* Nucleic acid sequence analysis. N.Y. ; L. : Columbia University Press, 1972. 282 p.
21. *Madi A., Friedman Y., Roth D., Regev T., Bransburg-Zabary S., Jacob E. B.* Genome holography : Deciphering function-form motifs from gene expression data // *PLoS One*. 2008. Vol. 3, iss. 7. P. 114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0002708>
22. *Ulyanov S. S., Zaytsev S. S., Ulianova O. V., Saltykov Y. V., Feodorova V. A.* Using of methods of speckle optics for *Chlamydia trachomatis* typing // *Proc. SPIE*. 2017. Vol. 10336. Paper 03360D. DOI: 10.1117/12.2270760
23. *Ulyanov S. S., Ulianova O. V., Zaytsev S. S., Saltykov Y. V., Feodorova V. A.* Statistics on gene-based laser speckles with a small number of scatterers: implications for the detection of polymorphism in the *Chlamydia trachomatis omp1* gene // *Laser Physics Letters*. 2018. Vol. 15, № 4. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aaa11c>
24. *Feodorova V. A., Ulyanov S. S., Zaytsev S. S., Saltykov Y. V., Ulianova O. V.* Optimization of algorithm of coding of genetic information of *Chlamydia* // *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10716. Paper 107160Q. DOI: 10.1117/12.2314640
25. *Feodorova V. A., Saltykov Y. V., Zaytsev S. S., Ulyanov S. S., Ulianova O. V.* Application of virtual phase-shifting speckle-interferometry for detection of polymorphism in the *Chlamydia trachomatis omp1* gene // *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10716. Paper 107160M. DOI: 10.1117/12.2314700
26. World Health Organization. Media centre. Diarrhoeal disease. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs330/en/> (дата обращения: 01.05.2017).
27. *Забокрицкий Н. А.* Инфекционная заболеваемость в Российской Федерации и тенденции ее развития в ближайшее десятилетие // *Вестн. «Здоровье и образование в XXI веке»*. 2015. Т. 17, № 5. С. 16–26.
28. Роспотребнадзор обнаружил статистику инфекционных болезней за первое полугодие. URL: <http://www.yaprivit.ru/news/2365/> (дата обращения: 18.07.2016).
29. *D'haeseleer P.* What are DNA sequence motifs? // *Nature Biotechnology*. 2006. Vol. 24, iss. 4. P. 423–425. DOI: 10.1038/nbt0406-423
30. *Kukkonen M., Korhonen K.* The omp1 family of enterobacterial surface proteases/adhesins : from housekeeping in *Escherichia coli* to systemic spread of *Yersinia pestis* // *Intern. J. Med. Microbiol.* 2004. July. Vol. 294, № 1. P. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2004.01.003>
31. *Федорова В. А., Хижнякова М. А., Зайцев С. С., Ляпина А. М., Саяпина Л. В., Ляпина Е. П., Ульянова О. В., Мотин В. Л.* Изучение диагностической значимости иммунореактивных эпитопов протеаз семейства Omp1 с использованием пептидной библиотеки // *Биопрепараты*. 2017. Т. 17, № 3. С. 180–186.
32. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
33. *Гудман Дж.* Статистическая оптика. М. : Мир, 1988. 528 с.
34. *Jakeman E.* Speckle statistics with a small number of scatterers // *Optical Engineering*. 1984. Vol. 23, № 4. P. 453–661. DOI: 10.1117/12.7973317
35. *Daugman J.* How Iris Recognition Works // *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*. 2004. Vol. 14, № 1. January. P. 21–30. DOI: 10.1109/TCSVT.2003.818350
36. *Wendy L. Martinez, Angel R. Martinez.* Computational statistics handbook with Matlab. Boca Raton ; London ; N.Y. ; Washington. D.C. : Chapman & Hall / CRC, 2002. 585 p.

Образец для цитирования:

Ульянов С. С., Ульянова О. В., Зайцев С. С., Хижнякова М. А., Салтыков Ю. В., Филонова Н. Н., Субботина И. А., Ляпина А. М., Федорова В. А. Исследование статистических характеристик оптических GB-спеклов, формирующихся при рассеянии света на виртуальных структурах нуклеотидных последовательностей генов энтеробактерий // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 123–137. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-123-137.

Study of Statistical Characteristics of GB-speckles, Forming at Scattering of Light on Virtual Structures of Nucleotide Gene Sequences of Enterobacteria

S. S. Ulyanov, O. V. Ulianova, S. S. Zaitsev, M. A. Khizhnyakova Yu. V. Saltykov, N. N. Filonova, I. A. Subbotina, A. M. Lyapina, V. A. Feodorova

Sergey S. Ulyanov, ORCID 0000-0003-3030-6927, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia

Onega V. Ulianova, ORCID 0000-0003-4420-2408, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Saratov, 24, Strelkovaja Divizija Str., Saratov, 410028, Russia

Sergey S. Zaitsev, ORCID 0000-0002-1373-8229, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Saratov, 24, Strelkovaja Divizija Str., Saratov, 410028, Russia

Yury V. Saltykov, ORCID 0000-0001-8163-1979, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Saratov, 24, Strelkovaja Divizija Str., Saratov, 410028, Russia



Maria A. Khizhnyakova, ORCID 0000-0001-7053-8322, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Saratov, 24, Strelkovaja Divizija Str., Saratov, 410028, Russia

Nadezhda N. Filonova, ORCID 0000-0003-1313-6241, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Saratov, 24, Strelkovaja Divizija Str., Saratov, 410028, Russia

Irina A. Subbotina, ORCID 0000-0003-4386-5058, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Saratov, 24, Strelkovaja Divizija Str., Saratov, 410028, Russia

Anna M. Lyapina, ORCID 0000-0003-3527-2076, researcher, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Saratov, 24, Strelkovaja Divizija Str., Saratov, 410028, Russia

Valentina A. Feodorova, ORCID 0000-0002-3827-407X, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Branch in Saratov, 24, Strelkovaja Divizija Str., Saratov, 410028, Russia

Background and Objectives: A brief review of methods of modern bioinformatics, based on the usage of virtual optical GB-speckles (gene-based speckles), has been presented in this paper. An algorithm of transformation of a nucleotide sequence into a 2D GB-speckle-structure has been proposed and discussed. **Materials and Methods:** Computer simulation of the process of formation of GB-speckles at the scattering of coherent light on quasi-random virtual surfaces, corresponding to initial nuclear sequence of the genes, encoded by the Omptin family proteins, such as *SopA*, *OmpP*, *OmpT*, *PgtE* and *Pla* in Enterobacteriaceae spp. has been carried out.

Results: Statistical properties of GB-speckles, coding of different sequences of the genes have been investigated. **Conclusion:** It has been shown that GB-speckles of this type obey Gaussian statistics. It has also been found that classical methods of statistical analysis of GB speckles are not informative and low-effective from a viewpoint of detection of common fragments in initial nucleotide sequences. However, a direct comparison of the probability density functions of spatial fluctuations of the speckle intensity allows to find common motifs of the comparing genes. A criterion for the reliable detection of the presence of common motifs in these genes, based on the methods of speckle-optics has been suggested. These motifs could be innovated promising molecular targets for the development of a new generation of effective synthetic Omptin-based peptide precise medical devices for smart laboratory diagnostics of a group of Gram-negative Enterobacterial pathogens.

Key words: nucleotide sequence, GB speckles, reference sequence, diffraction of coherent light, SNP, virtual random surfaces, Omptin proteins, gene.

Acknowledgements: This work was supported by PFNI RAS on 2018 year, direction 160, project no. 0615-2018-0001.

References

1. Sintchenko V., Roper M. P. Pathogen genome bioinformatics. *Methods in Molecular Biology*, 2014, vol. 1168, pp. 173–193.
2. Lesk A. M. *Introduction to bioinformatics*. Oxford, Oxford University Press, 2002. 314 p.
3. Guo Q., Strauss K., Ceze L., Malvar H. High-density image storage using approximate memory cells. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. ASPLOS'16*, Apr 2–6, 2016. Atlanta (US), IEEE, 2016, pp. 413–426. DOI: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2872362.2872413>
4. Bornholt J., Lopez R., Carmean D. M., Ceze L., Seelig G., Strauss K. A DNA-based archival storage system. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. ASPLOS'16*, Apr 2–6, 2016. Atlanta (US), IEEE, 2016, pp. 637–649. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2872362.2872397>
5. Rocky Pimentel. *Why Data Storage Is Hot Again*. Available at: <https://www.recode.net/2014/1/10/11622168/stuffed-why-data-storage-is-hot-again-really> (accessed 10 January 2014).
6. Bornholt J., Lopez R., Carmean M. D. Toward a DNA-based archival storage system. *IEEE MICRO*, 2017, vol. 37, iss. 3, pp. 98–104.
7. Bornholt J., Lopez R., Ceze L. A DNA-Based Archival Storage System. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. ASPLOS'16*, Apr 2–6, 2016. Atlanta (US), IEEE, 2016, pp. 637–649. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2872362.2872397>
8. Guo Q., Strauss K., Ceze L. High-Density Image Storage Using Approximate Memory Cells. *ASPLOS '16*, 2016, pp. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2872362.2872413>
9. Organick L., Dumas S., Ang S. D., Chen Y.-J., Lopez R. Scaling up DNA data storage and random access retrieval. *BioRxiv*, 2017, Posted March 7, pp. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1101/114553>
10. Rashtchian C., Makarychev K., Rác M. Clustering Billions of Reads for DNA Data Storage. *31st Conference on Neural Information Processing Systems*, Dec 4–9, 2017. Long Beach (US), NIPS. 2017, pp. 1–12.
11. *Video This Too Shall Pass by group OK Go*. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=qybUFnY7Y8w> (accessed 1 March 2018).
12. Rojahn S. Y. *An Entire Book Written in DNA*. Available at: <https://www.technologyreview.com/s/428922/an-entire-book-written-in-dna> (accessed 16 August 2012).
13. Church G. M., Gao Y., Kosuri S. Next-Generation Digital Information Storage in DNA. *Science*, 2012, vol. 337, pp. 1628.
14. Blawat M., Gaedke K., Hütter I. Forward Error Correction for DNA Data Storage. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 80, pp. 1011–1022.
15. Shipman S. L., Nivala J., Macklis J. D. CRISPR-Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria. *Nature*, 2017, vol. 547, pp. 345–349. DOI: 10.1038/nature23017



16. Goldman N., Bertone P., Chen S., Dessimoz Ch., LeProust E. M., Sipos B., Birney E. Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA. *Nature*, 2013, vol. 494, pp. 77–80. DOI: 10.1038/nature11875
17. Gibson D. G., Glass J. I., Lartigue C., Noskov V. N., Chuang R. Y., Algire M. A., Benders G. A., Montague M. G., Ma L., Moodie M. M., Merryman C., Vashee S., Krishnakumar R., Assad-Garcia N., Andrews-Pfannkoch C., Denisova E. A., Young L., Qi Z. Q., Segall-Shapiro T. H., Calvey C. H., Parmar P. P., Hutchison C. A. 3rd., Smith H. O., Venter J. C. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science*, 2010, vol. 329, pp. 52–56.
18. Clelland C. T., Risca V., Bancroft C. Hiding messages in DNA microdots. *Nature*, 1999, vol. 399, pp. 533–534.
19. Adleman L. M. Molecular computation of solutions to combinatorial problems. *Science*, 1994, vol. 266, pp. 1021–1024.
20. Mandeles S. *Nucleic acid sequence analysis*. New York, London, Columbia University Press, 1972. 282 p.
21. Madi A., Friedman Y., Roth D., Regev T., Bransburg-Zabary S., Jacob E. B. Genome holography: Deciphering function-form motifs from gene expression data. *PLoS One*, 2008, vol. 3, iss. 7, pp. 114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0002708>
22. Ulyanov S. S., Zaytsev S. S., Ulianova O. V., Saltykov Y. V., Feodorova V. A. Using of methods of speckle optics for *Chlamydia trachomatis* typing. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10336, paper 03360D. DOI: 10.1117/12.2270760
23. Ulyanov S. S., Ulianova O. V., Zaytsev S. S., Saltykov Y. V., Feodorova V. A. Statistics on gene-based laser speckles with a small number of scatterers: implications for the detection of polymorphism in the *Chlamydia trachomatis omp1* gene. *Laser Physics Letters*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aa111c>
24. Feodorova V. A., Ulyanov S. S., Zaytsev S. S., Saltykov Y. V., Ulianova O. V. Optimization of algorithm of coding of genetic information of *Chlamydia*. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10716, paper 107160Q. DOI: 10.1117/12.2314640
25. Feodorova V. A., Saltykov Y. V., Zaytsev S. S., Ulyanov S. S., Ulianova O. V. Application of virtual phase-shifting speckle-interferometry for detection of polymorphism in the *Chlamydia trachomatis omp1* gene. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10716, paper 107160M. DOI: 10.1117/12.2314700
26. World Health Organization. Media centre. Diarrhoeal disease. Available at: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs330/en/> Updated (accessed 1 May 2018).
27. Zabokritskiy N. A. The infectious morbidity in the Russian Federation and tendencies of its development in the next decade. *Bulletin "Health & education millennium"*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 16–26 (in Russian).
28. *Rospotrebnadzor obnarodoval statistiku infektsionnykh boleznei za pervoe polugodie* (Rospotrebnadzor published statistical data regarding infection diseases for first half of year). Available at: <http://www.yaprivit.ru/news/2365/> (accessed 18 July 2016) (in Russian).
29. D'haeseleer P. What are DNA sequence motifs? *Nature Biotechnology*, 2006, vol. 24, iss. 4, pp. 423–425. DOI: 10.1038/nbt0406-423
30. Kukkonen M., Korhonen K. The omptin family of enterobacterial surface proteases/adhesins: from house-keeping in *Escherichia coli* to systemic spread of *Yersinia pestis*. *Intern. J. Med. Microbiol.*, 2004, July, vol. 294, no. 1, pp. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2004.01.003>
31. Feodorova V. A., Khizhnyakova M. A., Zaitsev S. S., Lyapina A. M., Sayapina L. V., Lyapina E. P., Ulyanova O. V., Motin V. L. Evaluation of diagnostic potential of immunoreactive epitopes of the Omptin protease family by using a peptide library. *Biopreparations*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 180–186 (in Russian).
32. Kobzar' A. I. *Prikladnaia matematicheskaia statistika. Dlia inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied Statistics for Engineers and Scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. 816 p. (in Russian).
33. Goodman J. *Statisticheskaya optika* [Statistical Optics]. Moscow, Mir Publ., 1988. 528 p. (in Russian).
34. Jakeman E. Speckle statistics with a small number of scatterers. *Optical Engineering*, 1984, vol. 23, no. 4, pp. 453–661. DOI: 10.1117/12.7973317
35. Daugman J. How Iris Recognition Works. *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*, 2004, vol. 14, no. 1, January, pp. 21–30. DOI: 10.1109/TCSVT.2003.818350
36. Wendy L. Martinez., Angel R. Martinez. *Computational statistics handbook with Matlab*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., Chapman & Hall / CRC, 2002. 585 p.

Cite this article as:

Ulyanov S. S., Ulianova O. V., Zaitsev S. S., Khizhnyakova M. A., Saltykov Yu. V., Filonova N. N., Subbotina I. A., Lyapina A. M., Feodorova V. A. Study of Statistical Characteristics of GB-speckles, Forming at Scattering of Light on Virtual Structures of Nucleotide Gene Sequences of Enterobacteria. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 123–137 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-123-137.



МЕТОДИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ

УДК 535.1, 536.3, 539.1

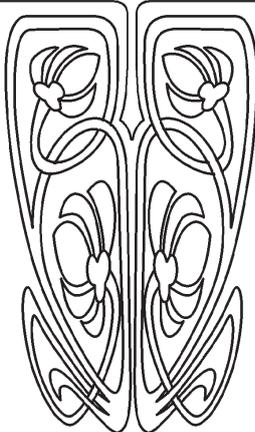
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ФОРМ (методические заметки)

В. И. Цой

Цой Валерий Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиофизики и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, tsoyvi@info.sgu.ru



МЕТОДИЧЕСКИЙ
ОТДЕЛ



В свое время Альберт Эйнштейн высказывал мнение, что ни создатель статистической механики Людвиг Больцман, ни распространивший вероятностное понимание энтропии на излучение Макс Планк не дали должного определения введенных ими термодинамических вероятностей как числа равновероятных микросостояний. Различные формулы для чисел микросостояний Больцмана и Планка требовало осмысления. В частности, отмечалось, что термодинамическая вероятность Планка выражается формулой для суммы термодинамических вероятностей Больцмана. Кроме того, состояния световых квантов-частиц и состояния ферми-газа имеют свои особенности. Между тем сопоставление различных термодинамических вероятностей до сих пор остается методически затруднительным. В связи с этим желательны такие подходы, при которых микросостояния и макроскопические состояния разных систем можно рассматривать и сопоставлять единым образом. В данной статье для отчетливого различения определений термодинамических вероятностей использовано полиномиальное распределение математических вероятностей. В уравнении, определяющем полиномиальную форму, аргументы полинома полагаются равными вероятностям, с которыми микрочастица, осциллятор или фазовая ячейка характеризуются возможными для них значениями энергии. Степень полинома полагается равной числу этих элементов или элементов энергии в общей системе. В разложении полинома по степеням аргументов слагаемые не содержат информации об отдельных элементах системы, т. е. определяют вероятности ее макроскопического состояния. В статье в рамках этой единой схемы рассмотрены термодинамические вероятности Больцмана для классического молекулярного газа, Планка для излучающих квантовых осцилляторов, Бозе для квантов-частиц теплового излучения и термодинамическая вероятность ферми-газа. Прослеживается, каким образом различия в термодинамических вероятностях проявляются в полиномиальных формах. В частности, показан чисто алгебраический смысл равенства термодинамической вероятности Планка сумме термодинамических вероятностей Больцмана.

Ключевые слова: термодинамическая вероятность, энтропия, распределение частиц по энергии, полиномиальная форма.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-138-143

Введение

Обсуждая связь энтропии $S = k \ln W$ с термодинамической вероятностью W , Эйнштейн высказывал мнение, что ни первооткрыватель вероятностной природы энтропии Больцман, ни давший дальнейшее развитие учению об энтропии Планк не



дали должного определения введенных ими термодинамических вероятностей как чисел равновероятных микроскопических состояний, реализующих макроскопическое состояние рассматриваемой системы [1, с. 17]. Различие чисел микросостояний Больцмана и Планка требовало осмысления. В частности, подчеркивалось, что число микросостояний по Планку просто равно сумме чисел микросостояний по Больцману [2]. Однако нужно отметить, что осцилляторы Планка введены только с помощью резонансной частоты и декремента затухания, безотносительно к местонахождению, массе и заряду [3]. Осцилляторы обмениваются энергией не в парных столкновениях, а посредством

излучения и поглощения квантов энергии светового поля, так что осциллятор взаимодействует в этом смысле со всеми другими осцилляторами, находясь в создаваемом ими поле. Как оказалось, это резко разграничивает статистику молекул газа Больцмана и статистику осцилляторов Планка. В связи с этим полезно обратить внимание на то, как можно сопоставить по-разному определенные термодинамические вероятности с помощью полиномиального распределения, которое упоминалось, например, в книге Макса Борна [4].

Термодинамическая вероятность Больцмана

Рассмотрим полиномиальную форму

$$(x_0 + x_1 + \dots + x_p)^N = \sum_{\substack{(N_0, N_1, \dots, N_p) \\ N_0 + N_1 + \dots + N_p = N}} \frac{N!}{N_0! N_1! \dots N_p!} x_0^{N_0} x_1^{N_1} \dots x_p^{N_p}. \quad (1)$$

Придадим величине x_j смысл математической вероятности иметь энергию E_j одной молекуле, случайным образом меняющей энергию при столкновении с другой молекулой. Тогда равенство (1) приобретает смысл суммы вероятностей иметь энергию E_j каждой из N_j частиц в разбиении $\{N_j\} = (N_0, N_1, \dots, N_p)$ системы $N = \sum N_j$ частиц. Так как скобка левой части (1) содержит сумму всех вероятностей для энергий частицы, то она равна единице. Эти вероятности относятся к микросостояниям частицы. Не равные друг другу вероятности x_j соответствуют случаям, когда частица имеет одну и ту же энергию в нескольких равновероятных микросостояниях. В правой части содержится сумма вероятностей всех возможных разбиений частиц $\{N_j\} = (N_0, N_1, \dots, N_p)$ на группы с энергиями E_0, E_1, \dots, E_p , приходящимися на одну частицу. Здесь не прослеживается, какие именно частицы попали в группы разбиения, и каждое из $(P + N)!/(P!N!)$ слагаемых формы предстает макроскопическим состоянием с вероятностью, взвешенной полиномиальным коэффициентом

$$Z(N; N_0, N_1, \dots, N_p) = \frac{N!}{N_0! N_1! \dots N_p!}. \quad (2)$$

Положим сначала, что все доступные для микрочастицы энергии равновероятны в соответствующих этому интервалах энергии с вероятностью $x_j = 1/(P + 1)$. Тогда форма (1) принимает вид

$$1 = \sum_{(N_0, N_1, \dots, N_p)} Z(N; N_0, N_1, \dots, N_p) (1/(P + 1))^N, \quad (3)$$

т.е. каждое разбиение с неразличимыми частицами в каждой группе разбиения, но с различными группами по присущим им энергиям одной частицы, встречается с частотой, пропорциональной полиномиальному коэффициенту $Z(N; N_0, N_1, \dots, N_p)$. Это вполне соответствует больцмановской процедуре мысленной группировки N молекул с заданной полной энергией в макроскопически различимые распределения. Для наглядности Больцман представляет такую группировку как многократную процедуру придания последовательно перебираемым молекулам энергии E_j по запискам, извлекаемым с равной вероятностью из урны [5]. Далее в качестве «комплексий» отбираются те варианты, в которых суммарная энергия имеет одно и то же значение $\sum N_j E_j = E$. Если рассматривать комплексии, энергия которых $E = L\epsilon$ кратна некоторому элементу энергии ϵ , то полное число перестановок молекул, образующих все такие комплексии, равно числу распределений L элементов по N молекулам, т.е. $((N - 1) + L)!/((N - 1)!L!)$. Нетрудно видеть, что в полиномиальной форме присутствуют все варианты распределения молекул по энергиям, включая комплексии Больцмана, но без ограничения на суммарную энергию. С этой оговоркой можно принять, что коэффициент



ты (2) формы (1) представляют собой термодинамическую вероятность Больцмана.

Возможным состояниям системы отвечают такие наборы комбинаций $\{N_j\}$, для которых макроскопическая вероятность, т.е. слагаемое в правой части формы (1), максимальна при условиях постоянства полного числа частиц $\sum N_j = N$ и полной энергии $\sum N_j E_j = E$. Выявляя такое состояние в пределе больших чисел N и P , можно получить закон распределения Больцмана числа частиц по энергиям $n_j = \text{const } x_j \exp(-\beta E_j)$ [4].

Следует заметить, что Больцман при подсчете числа микросостояний полагал интервал $(E_{j+1} - E_j) = \epsilon$ между последовательными значениями энергии частицы постоянным и устремлял этот интервал к нулю в соответствии с возможностью любого значения энергии для классических частиц. Он также предписывал равные вероятности $x_j = 1/(P + 1)$ попаданиям в эти интервалы, что не всегда справедливо. Действительно, в однородном силовом поле частица имеет потенциальную энергию E_{pot} , и плотность распределения частиц по энергии пропорциональна множителю $\exp(-E_{pot}/kT)$. Однако плотность распределения по кинетической энергии пропорциональна $\sqrt{E_{kin}} \exp(-E_{kin}/kT)$.

Термодинамическая вероятность Планка

Термодинамическая вероятность Планка определяется как число распределений P квантов энергии по N одинаковым осцилляторам, т.е. равна величине [3]

$$W = \frac{(N-1+P)!}{(N-1)!P!} \approx \frac{(N+P)!}{N!P!}. \quad (4)$$

Различие термодинамических вероятностей Больцмана и Планка предсказуемо проявляется и в определяющих их полиномиальных формах.

Пусть известно, что N осцилляторам может быть придана энергия $P\epsilon$ путем различных распределений P квантов энергии по осцилляторам. Тогда естественно рассмотреть вероятности x_j найти один квант энергии в группе из N_j осцилляторов. Полиномиальная форма для распределения P квантов по всем осцилляторам принимает вид

$$(x_1 + \dots + x_N)^P = \sum_{\substack{(P_1, \dots, P_N) \\ P_1 + \dots + P_N = P}} \frac{P!}{P_1! \dots P_N!} x_1^{P_1} \dots x_N^{P_N}. \quad (5)$$

Однако вероятности x_j случайного придания энергии отдельному осциллятору не обусловлены непосредственным обменом энергии между осцилляторами, а только испусканием и поглощением ими волн излучения. Положим, что вероятности x_j в форме (5) для системы осцилляторов остаются статистически неопределенными, но сама форма сохраняется в том смысле, что вероятности нормированы на единицу. В таком случае можно сложить множество форм (5) с неопределенными вероятностями и затем сумму разделить на число этих форм. При этом все x_j равноправны и в усредненной форме (5), все слагаемые становятся равными. Тогда энтропия, пропорциональная минус среднему логарифму вероятностей всех состояний, оказывается пропорциональной логарифму числа слагаемых полиномиальной формы, т.е. величине (4).

Таким образом, термодинамические вероятности Планка (4) и Больцмана (2) предстают в полиномиальных формах вероятностей (5) и (1) совершенно по-разному, в соответствии с тем, что статистика излучающих осцилляторов не может быть сведена к статистике в молекулярной физике. Мы знаем, что вычисление энтропии осциллятора $S = k \ln W$ и ее производной по энергии $dS/dE = 1/T$ дает правильную формулу для средней энергии осциллятора и формулу Планка для энергии теплового излучения [3].

Термодинамическая вероятность Бозе

Далее обратимся к картине поля излучения с частотой ν как совокупности световых частиц-квантов, имеющих энергию $h\nu$, и пропорциональный ей импульс $h\nu/c$. В этом случае можно явно определить фазовое пространство, элементами объема которого служит действие. Фазовое пространство разбивается на элементарные ячейки с объемом, равным кубу постоянной Планка h^3 . При этом форма ячейки не определена, но все световые частицы должны считаться неразличимыми при взаимной перестановке, как подразумевается в статье Дж. Бозе [1, с. 60]. Таким образом, можно провести параллель между фазовыми ячейками с возможными энергиями $j h \nu_s$ и молекулами газа с возможными энергиями $j \epsilon$, а потому в полиномиальной форме (1) число N заменить на число $N_s = \sum N_{j_s}$ фазовых ячеек с квантами на частоте ν_s .



Ячейки разбиты на группы по N_{j_s} ячеек, содержащих j_s квантов, причем взаимные перестановки частиц даже из разных групп неразличимы. С полной определенностью сохраняется только полная во всем спектре энергия $E = \sum N_{j_s} j_s h\nu_s$. Поскольку числа фазовых ячеек, содержащих кванты различных частот, могут различаться, форму (1) следует преобразовать по правилу умножения вероятностей к обобщенному виду

$$\prod_s (x_{0s} + \dots + x_{P_s})^{N_s} = \prod_s \sum_{N_{0s} + \dots + N_{P_s} = N_s} \frac{N_s!}{N_{0s}! \dots N_{P_s}!} x_{0s}^{N_{0s}} \dots x_{P_s}^{N_{P_s}}, \quad (6)$$

$$\text{т.е. } 1 = \prod_s \sum_{\{N_j\}_s} \frac{N_s!}{N_{0s}! \dots N_{P_s}!} x_{0s}^{N_{0s}} \dots x_{P_s}^{N_{P_s}}. \quad (7)$$

Здесь через $\{N_j\}_s$ обозначены состояния, в которых N_{j_s} ячеек заполнены каждая j_s квантами с энергией кванта $h\nu_s$ при фиксированном числе ячеек N_s на частоте ν_s . Число слагаемых в каждой сумме (7) равно $C_s = (P_s + N_s)! / (P_s! N_s!)$. После перемножения всех сумм получим равенство

$$\prod_{\{\{N_j\}_s\}} C_s \prod_s \frac{N_s!}{N_{0s}! N_{1s}! \dots N_{P_s}!} x_{0s}^{N_{0s}} x_{1s}^{N_{1s}} \dots x_{P_s}^{N_{P_s}} = 1. \quad (8)$$

Здесь через $\{\{N_j\}_s\}$ обозначены варианты заполнения квантами ячеек на всех частотах. Полагая все вероятности x_{j_s} заполнения равными друг другу, получим из последнего соотношения термодинамическую вероятность Бозе:

$$W^{Bose} = \prod_s \frac{N_s!}{N_{0s}! N_{1s}! \dots N_{P_s}!}. \quad (9)$$

Отыскивая максимум величины (9) относительно чисел ячеек N_{j_s} , с учетом того, что сохраняется суммарная по всем частотам энергия $E = \sum N_{j_s} j_s h\nu_s$, и того, что на каждой частоте сохраняется число ячеек $N = \sum N_s$, Бозе получил для среднего числа световых квантов в одном состоянии выражение $n = 1 / \{\exp(h\nu/kT) - 1\}$.

Термодинамическая вероятность ферми-газа

Рассмотрим также полиномиальную форму и соответствующую термодинамическую вероятность для частиц, подчиняющихся правилу запрета Паули. В этом случае в одной фазовой ячейке не может быть более одной частицы, и частица отсутствует с вероятностью x_{0s} или заполняет ячейку с вероятностью $x_{1s} = (1 - x_{0s})$ и с

энергией E_s . Если число таких ячеек равно N_s , причем не заполнено N_{0s} ячеек и заполнено N_{1s} ячеек, то вероятностная форма (6) переходит в произведение биномов

$$\prod_s (x_{0s} + x_{1s})^{N_s} = \prod_s \sum_{N_{0s} + N_{1s} = N_s} \frac{N_s!}{(N_s - N_{1s})! N_{1s}!} x_{0s}^{N_{0s}} x_{1s}^{N_{1s}}. \quad (10)$$

Так как биномиальные суммы содержат по $B_s = (N_s + 1)$ слагаемых, равенство (10) можно переписать в виде

$$\sum_{\{\{N_{0s} N_{1s}\}\}} \prod_s \frac{N_s!}{(N_s - N_{1s})! N_{1s}!} x_{0s}^{N_{0s}} x_{1s}^{N_{1s}} = 1. \quad (11)$$

Здесь через $\{\{N_{0s} N_{1s}\}\}$ обозначены варианты заполнения ячеек во всем спектре энергий E_s . Получаем, что термодинамическую вероятность для ферми-газа можно представить в форме

$$W^F = \prod_s \frac{N_s!}{(N_s - N_{1s})! N_{1s}!}. \quad (12)$$

Отыскивая максимум этой вероятности относительно чисел N_{1s} заполненных ячеек при условии сохранения полной энергии $E = \sum N_s E_s$ и при условии, что неизменно полное число фазовых ячеек $N = \sum N_s$, можно получить среднее число заполненных ячеек. Поскольку заполненная ячейка содержит одну ферми-частицу, этим числом определяется среднее число частиц в одном состоянии $n = 1 / \{\exp[(E - F)/kT] + 1\}$.

Заключение

Разумеется, схема построения термодинамической вероятности с помощью полиномиальной формы не может быть универсальной. Например, можно получить статистику Бозе, отправляясь не от распределений фазовых ячеек (6), а от термодинамической вероятности Планка (4) для квантов энергии на одной частоте. Неразличимость частиц по Бозе при перестановке между частицами с различной энергией (частотой) означает, что сохраняется лишь полная энергия квантов со всеми частотами. Следовательно, наиболее вероятному состоянию, отвечающему термодинамическому равновесию, соответствует максимум планковских чисел состояний относительно распределений числа квантов по частотам. По существу, такой подход использован в книге [4]. Этот пример не вписывается явно в рамки полиномиальной формы.



Тем не менее анализ термодинамических вероятностей с помощью схемы полиномиального распределения приносит свою пользу. Отчетливо видно, что неудовлетворенность А. Эйнштейна определениями термодинамической вероятности Л. Больцманом и М. Планком имела свой резон и последствия. Именно на пути к более строгим определениям термодинамической вероятности было положено начало квантовой статистике.

Полиномиальные вероятностные формы особенно ясно показывают, что для состояний различных систем частиц термодинамические вероятности могут различаться. Однако между ними могут найтись определенные алгебраические соотношения. Как отмечалось, формула для числа всех комплексов Больцмана с данной энергией совпадает с формулой для числа микросостояний осцилляторов по Планку. Такое совпадение происходит потому, что в обоих случаях подсчитывается число распределений фиксированного числа элементов энергии по молекулам или осцилляторам. Однако для осцилляторов, в отличие от сталкивающихся молекул, нельзя указать определенные комбинации осцилляторов, которые участвуют в излучении или поглощении всей системой. В итоге термо-

динамические вероятности Больцмана и Планка различаются. Заметим также, что в соответствии с равенством (3) полное число микросостояний, охватываемых полиномиальной формой, равно $(P + 1)^N$. Это, конечно, не совпадает с числом микросостояний по Планку (4).

Данная заметка показывает, что представление статистик классического газа, теплового излучения и квантовых частиц с помощью единой схемы полиномиального распределения может быть полезным при обращении к началам статистической физики.

Список литературы

1. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов : в 3 т. М. : Наука, 1966. Т. 3. 632 с.
2. *Клейн М. Дж.* Макс Планк и начало квантовой теории // УФН. 1967. Т. 92. С. 679–700. DOI: 10.3367/UFN.0092.196708d.0679
3. *Планк М.* Избранные труды. М. : Наука, 1975. 788 с.
4. *Борн М.* Атомная физика. М. : Мир, 1965. 484 с.
5. *Sharp K., Matschinsky F.* Translation of Ludwig Boltzmann's Paper «On the Relationship between the Second Fundamental Theorem of the Mechanical Theory of Heat and Probability Calculations Regarding the Conditions for Thermal Equilibrium». (Wien. Ber. 1877, 76:373–435) // Entropy. 2015. Vol. 17. P. 1971–2009. DOI: 10.3390/e17041971

Образец для цитирования:

Цой В. И. Представление термодинамических вероятностей с помощью полиномиальных форм (методические заметки) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 138–143. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-138-143.

Derivation of the Thermodynamic Probabilities Using Polynomial Forms

V. I. Tsoy

Valery I. Tsoy, ORCID 0000-0001-8055-4385, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, tsoyvi@info.sgu.ru

Background and Objectives: A. Einstein suggested at the time that neither the founder of the statistical mechanics L. Boltzmann, nor M. Planck, who has developed the statistical understanding of the entropy of radiation, gave the proper definitions of the thermodynamic probability as a number of equally probable microstates. Meanwhile it was necessary to understand the difference between the Boltzmann's and Planck's numbers of microstates. In particular, the Planck thermodynamic probability is expressed by the formula for the sum of the Boltzmann thermodynamic probabilities. The state of the light particles and the state of the Fermi gas have their own peculiarities. In this regard, such approaches are desirable,

in which microstates and macroscopic states of different systems can be considered and compared in a single way. **Methods:** In this paper, the polynomial probability distribution is used to distinguish between distinct definitions of the thermodynamic probability. In the equation that defines the polynomial form, the arguments of the polynomial are supposed to be equal to the probabilities characterizing a micro particle or an oscillator or a phase cell. The degree of polynomials is equal to the numbers of such elements. Each term in the decomposition of the polynomial in powers of the arguments gives the probability of a state in which the individual elements of the system are indistinguishable, that is, the probability of the observed macroscopic state. Using this scheme, it is sometimes possible to trace the correlation between the probabilities of the microstates of the individual elements and the probabilities of the macroscopic states of the system. **Conclusion:** The Boltzmann thermodynamic probabilities for the classical molecular gas, the Planck thermodynamic probability for emitting quantized oscillators, the Bose thermodynamic probability for photons of thermal radiation, and the thermodynamic probability for Fermi gas are considered in the present paper within the framework of the



proposed approach. It is traced how the differences in thermodynamic probabilities are shown in polynomial forms. In particular, the article shows the refinement of the statement that the sum of the Boltzmann thermodynamic probabilities is the same, as the Planck thermodynamic probability.

Key words: thermodynamic probability, entropy, particles distribution, polynomial form.

References

1. Einstein A. *Sobranie nauchnykh trudov, tom 3* [Collection of scientific works, vol. 3]. Moscow, Nauka Publ., 1962. 632 p. (in Russian).
2. Klein M. J. *Maks Plank i nachalo kvantovoi teorii* Макс [Max Planck and the Beginnings of the Quantum Theory] . *UFN*, 1967, vol. 92, pp. 679–700. DOI: 10.3367/UFNr.0092.196708d.0679 (in Russian).
3. Planck M. *Izbrannye trudy* [Selected Works]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 788 p. (in Russian).
4. Born M. *Atomnaya fizika* [Atomic Physics]. Moscow, Mir Publ., 1965. 484 p. (in Russian).
5. Sharp K., Matschinsky F. Translation of Ludwig Boltzmann's Paper "On the Relationship between the Second Fundamental Theorem of the Mechanical Theory of Heat and Probability Calculations Regarding the Conditions for Thermal Equilibrium". (Wien. Ber. 1877, 76:373–435) *Entropy*, 2015, vol. 17, pp. 1971–2009. DOI:10.3390/e17041971

Cite this article as:

Tsoy V. I. Derivation of the Thermodynamic Probabilities Using Polynomial Forms. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 138–143 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-138-143.



ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

УДК 535.621.373.8:535.621.375.8

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В САРАТОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

В. М. Аникин, В. И. Цой

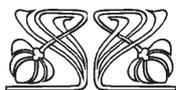
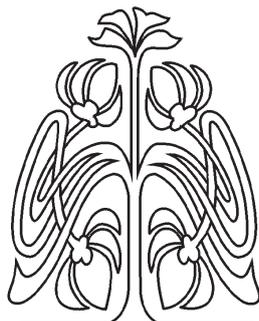
Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, декан, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, AnikinVM@info.sgu.ru

Цой Валерий Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, tsoyvi@info.sgu.ru

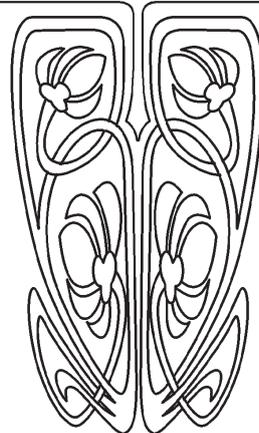
В начале 1970-х гг. в Саратовском государственном университете имени Н. Г. Чернышевского (СГУ) проводились исследования по созданию комптоновского лазера на свободных электронах. Научную группу возглавлял Борис Геннадьевич Цикин, доцент кафедры электроники. Результаты этих работ представлялись в центральных научных журналах, докладывались на международных и всесоюзных научных конференциях, получили положительную оценку в обзорных статьях, которые были опубликованы в журнале «Успехи физических наук». Исследования физиков СГУ – интересная страница истории создания лазеров на свободных электронах. Последним научно-техническим достижением в этой области является Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (2017).

Ключевые слова: лазер на свободных электронах, комптоновский лазер, Саратовский университет.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-144-148



ПРИЛОЖЕНИЯ



1 сентября 2017 г. в Германии (Гамбург) был запущен самый крупный в мире Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (ЕРЛСЭ – European x-ray free-electron laser (European XFEL)) [1]. Осуществлен дорогостоящий проект (более 1 млрд евро), значимость которого для физики систем атомного и молекулярного масштабов сопоставима со значимостью Большого адронного коллайдера для физики элементарных частиц и космологии. Из 12 стран-участниц этого проекта наибольший финансовый вклад внесли Германия (58%) и Россия (27%). Как показывает история вопроса [2–5], в развитии физики лазерного излучения свободными электронами отечественные исследователи внесли достойный вклад. Российским ученым предоставлены приоритетные возможности работы с ЕРЛСЭ.

Действие лазеров на свободных электронах состоит в вынужденном излучении модулированного по плотности пучка электронов, что можно осуществить различными способами: при ондуляторном излучении электронного пучка в периодическом поперечном магнитном поле в лазерной системе, при вынужденном черенковском излучении, при вынужденном комптоновском рассеянии. Теория



таких лазеров показывает, что многие выводы, сделанные для одной схемы, применимы к другим. Наиболее близкая аналогия существует между ондуляторным и комптоновским лазерами [5]. Исторически первыми исследованиями вынужденного излучения свободными электронами считают посвященные комптоновскому рассеянию фотонов на электронах работы классиков квантовой физики – Э. Шредингера (1927), П. Л. Капицы и П. Дирака (1933). Следующим шагом к идее комптоновского лазера стала теория Ф. Р. Арутюняна и В. А. Туманяна (1963, Ереванский физический институт) обратного эффекта Комптона при рассеянии излучения на встречном электронном потоке с преобразованием частоты излучения в область рентгеновских частот и частот гамма-излучения [6]. Использовать обратный эффект Комптона для усиления вынуж-

денного излучения предложил Р. Пантелл с соавторами (1968, Стэнфордский университет) [7].

Свой вклад в развитие теории комптоновских лазеров на свободных электронах внесла возглавляемая доцентом кафедры электроники Борисом Геннадьевичем Цикиным небольшая группа научных сотрудников физического факультета и НИИ механики и физики Саратовского университета. В состав этой группы входили: В. А. Дубровский (ныне заведующий кафедрой медбиофизики имени В. Д. Зёрнова Саратовского государственного медицинского университета имени В. И. Разумовского (СГМУ), А. П. Соловьев (доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ), Н. Б. Лернер (доцент СГМУ), А. А. Колотырин (впоследствии работал ассистентом кафедры «Общая физика» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.).



Научная группа студентов и аспирантов Б. Г. Цикина. Слева направо: Б. Г. Цикин, В. А. Дубровский, А. П. Соловьев, Н. Б. Лернер, А. А. Князев (начало 1970-х гг.)



Научный коллектив Б. Г. Цикина. Сидят: О. В. Зюрюкина, Б. Г. Цикин, А. А. Князев, Н. Б. Лернер, С. С. Аркадакский; стоят: К. И. Свинолулов, А. А. Колотырин, Л. Е. Долотов (середина 1980-х гг.)



Работы этой университетской группы 1970-х гг. [8–11] неоднократно являлись предметом обсуждения в журнале «Успехи физических наук» в рамках обзоров [3–5], посвященных взаимодействию свободных электронов с электромагнитным излучением и лазерам на свободных электронах. Саратовские авторы докладывали о результатах своих работ также на международных и всесоюзных научных конференциях (Венгрия, Balatonfured, 1972; Минск, 1972; Томск, 1972; Ташкент, 1974; Тбилиси, 1976; Ленинград, 1978; Хабаровск, 1979)¹. В 1977 г. В. А. Дубровский защитил кандидатскую диссертацию на тему «Теория лазерного эффекта на потоке нерелятивистских электронов», а в 1979 г. А. П. Соловьев – кандидатскую диссертацию на тему «Теоретическое исследование эффекта нелинейного усиления электромагнитных волн нерелятивистским прямолинейным электронным потоком в свободном пространстве».

Центральной проблемой на пути к реализации лазера на свободных электронах было отыскание таких условий, при которых достигалось бы достаточное для генерации усиление рассеянного вынужденного излучения. В обзоре В. Л. Кузнецова [4] отмечались предложенные и теоретически обоснованные саратовской группой способы стимулирования процессов усиления. Один из них – существенное увеличение

модуляции электронного пучка волной на разностной частоте волн накачки и сигнала. Автор обзора выделил другой теоретический вывод саратовцев – об увеличении усиления при переходе от коллинеарной схемы к неколлинеарной схеме рассеяния с различающимися направлениями волн и электронного потока.

В вышеназванном обзоре на основании этих результатов была поставлена задача оптимизации углов между направлениями волн сигнала и накачки, а также их ориентации относительно электронного потока. Эта задача была решена сотрудниками двух академических институтов – Физического института имени П. Н. Лебедева и Института общей физики – Д. Ф. Зарецким, Э. А. Нерсесовым, М. В. Федоровым (1981) [5, 12, 13]. Оказалось, что оптимальные условия генерации достигаются в релятивистских электронных пучках. Работы [12, 13] отнесены в книге [2] к числу значимых достижений российских исследований в области теории лазеров на свободных электронах. Должное тому, что исследования мирового уровня московских ученых были предварены работами, выполненными в Саратовском университете, отдается посредством ссылки на работу [9] в обзоре [14], одним из соавторов которого является безусловный авторитет в области квантовой электроники А. Ярив.

Существенно отметить, что помимо исследований по вынужденному комптоновскому рассеянию членами научного коллектива Б. Г. Цикина проведен серьезный теоретический анализ процессов электронно-волнового взаимодействия в приборах СВЧ, разработаны оригинальные эффективные методы лазерной диагностики и СВЧ диагностики электронных пучков и плазмы с высокой чувствительностью и возможностями панорамного наблюдения.

Благодарности

Авторы благодарны Д. А. Усанову за историческую справку о работах в СГУ в области теории лазеров на свободных электронах, С. С. Аркадакскому и Ю. П. Синичкину – за предоставленные фотографии.

Список литературы

1. В Германии открыли самый мощный рентгеновский лазер на свободных электронах. URL : <http://tass.ru/nauka/4525693> (дата обращения: 02.12.2017).
2. Мухин К. Н., Суставнов А. Ф., Тихонов В. Н. Российская физика Нобелевского уровня. М. : Физматлит, 2006. 228 с.

¹ *Doubrovski V. A., Tzikin B. G.* On possibility of accumulation of laser radiation scattered by electron beam // Int. conf. «On Interaction of Electron with Strong Electromagnetic Field». Balatonfured, 1972. P. 22 ; *Дубровский В. А., Цикин Б. Г.* Резонансное усиление излучения ОКГ, рассеянного электронным потоком // Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по нелинейной оптике. Минск, 1972. С. 101–102 ; *Соловьев А. П., Цикин Б. Г.* О возможности усиления излучения ОКГ электронным потоком в присутствии мощной оптической накачки // VII Всесоюзная конференция «Электронные приборы СВЧ и области их применения». Томск, 1972. Вып. 4. С. 204 ; *Соловьев А. П., Цикин Б. Г.* Об оптимальной скорости электронного пучка лазера на Комптон-эффекте // Тезисы докладов VII Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике. Ташкент, 1974. С. 194 ; *Дубровский В. А., Лернер Н. Б., Цикин Б. Г.* Полуклассическая теория Комптон-лазера (анализ методов повышения коэффициента усиления) // Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике. Тбилиси, 1976. С. 321 ; *Дубровский В. А., Колотырин А. А., Цикин Б. Г.* Перестраиваемые лазеры на электронных потоках (анализ методов повышения коэффициента усиления) // Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике : в 2 т. Л., 1978. Т. 1. С. 73 ; *Дубровский В. А., Колотырин А. А.* Некоторые особенности преобразования лазерного излучения в область вакуумного ультрафиолета на электронном потоке // Там же. С. 60 ; *Дубровский В. А., Колотырин А. А.* Влияние пространственных размеров лазера на электронном пучке на его энергетические характеристики // Лазерные пучки : сб. науч. тр. Хабаровск, 1979. С. 145–153.



3. Зельдович Я. Б. Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением // УФН. 1975. Т.115, вып. 2. С. 161–197. DOI: 10.3367/UFNr.0115.197502a.0161.
4. Кузнецов В. Л. Лазеры на свободных электронах // УФН. 1979. Т. 129, вып. 3. С. 541–547. DOI: 10.3367/UFNr.0129.197911f.0541.
5. Федоров М. В. Взаимодействие электронов с электромагнитным полем в лазерах на свободных электронах // УФН. 1981. Т. 135, вып. 2. С. 213–236. DOI: 10.3367/UFNr.0135.198110c.0213.
6. Arutyunian F. R., Tumanian V. A. The Compton effect on relativistic electrons and the possibility of obtaining high energy beams // Phys. Lett. 1963. Vol. 4. P. 176–178. DOI: 10.1016/0031-9163(63)90351-2.
7. Pantell R. H., Soncini G., Puthoff H. E. S-9 – Stimulated Photon-Electron Scattering // IEEE J. Quantum Electronics. 1968. Vol. 4. P. 905–907. DOI: 10.1109/JQE.1968.1074989.
8. Дубровский В. А., Цикин Б. Г. О возможности накопления излучения ОКГ, рассеянного электронным потоком // Радиотехника и электроника. 1972. Т. 17, № 7. С. 1433–1439.
9. Дубровский В. А., Лернер Н. Б., Цикин Б. Г. К теории Комpton-лазера // Квант. электроника. 1975. Т. 2. С. 2292–2302.
10. Соловьев А. П., Цикин Б. Г. Стимулирование медленной электромагнитной волной рассеяния излучения ОКГ электронным потоком // Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 307–309.
11. Дубровский В. А., Цикин Б. Г. Стимулирование рассеяния в Комpton-лазере замедленными волнами (полуклассическая теория) // Квант. электроника. 1977. Т. 4. С. 1473–1481.
12. Zaretskii D. F., Nersesov E. A., Fedorov M. V. Gain in a Compton laser // Sov. Phys. JETP. 1981. Vol. 53. P. 508–512.
13. Fedorov M. V., Nersesov E. A., Zaretskii D. F. On the possibility to optimize the gain of the Compton laser // Phys. Lett. 1981. Vol. 82A. P. 227–228. DOI: 10.1016/0375-9601(81)90192-4.
14. Gover A., Yariv A. Collective and Single-Electron Interaction of Electron Beam with Electromagnetic Waves, and Free-Electron Lasers // Appl. Phys. 1978. Vol. 16. P. 121–138.

Образец для цитирования:

Аникин В. М., Цой В. И. Исследования по физике лазеров на свободных электронах в Саратовском университете // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 144–148. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-144-148.

Physics of Free-electron Lasers in Saratov State University

V. M. Anikin, V. I. Tsoy

Valery M. Anikin, ORCID 0000-0002-6506-6997, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, AnikinVM@info.sgu.ru

Valery I. Tsoy, ORCID 0000-0001-8055-4385, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, tsoyvi@info.sgu.ru

In the early 1970s, Saratov State University carried out research on the creation of a Compton free electron laser. The scientific group was headed by Boris Gennadievich Tsikin, associate professor of the electronics chair. The results of these works were published in central scientific journals and presented at international and all-Union scientific conferences. They received a positive assessment in the review articles published in the journal «Physics-Uspеkhi». The investigations of physicists from SSU are interesting pages in the history of the creation of free-electron lasers. The European free electron X-ray laser, European XFEL (2017) is the latest scientific and technical achievement in this field.

Key words: free-electron lasers, Compton-laser, Saratov State University.

References

1. V Germanii odkryli samyj moshchnyj rentgenovskij lazer na svobodnyh ehlektronah [In Germany, the most powerful free-electron X-ray laser was discovered]. Available at: <http://tass.ru/nauka/4525693> (accessed 2 December 2017) (in Russian).

2. Mukhin K. N., Sustavnov A. F., Tikhonov V. N. *Rossiiskaya fizika Nobelevskogo urovnya* [Russian physics of Nobel level]. Moscow, Fizmatlit, 2006. 228 p. (in Russian).
3. Zel'dovich Ya. B. Interaction of free electrons with electromagnetic radiation. *Phys. Usp.*, 1975, vol. 18, pp. 79–98. DOI: 10.3367/UFNr.0115.197502a.0161
4. Kuznetsov V. L. Free-electron lasers. *Phys. Usp.*, 1979, vol. 22, pp. 934–938. DOI: 10.3367/UFNr.0129.197911f.0541
5. Fedorov M. V. Interaction of electrons with the electromagnetic field in free electron lasers. *Phys. Usp.*, 1981, vol. 24, pp. 801–814. DOI: 10.3367/UFNr.0135.198110c.0213
6. Arutyunian F. R., Tumanian V. A. The Compton effect on relativistic electrons and the possibility of obtaining high energy beams. *Phys. Lett.*, 1963, vol. 4, pp. 176–178. DOI: 10.1016/0031-9163(63)90351-2
7. Pantell R. H., Soncini G., Puthoff H. E. S-9 – Stimulated Photon-Electron Scattering. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1968, vol. 4, pp. 905–907. DOI: 10.1109/JQE.1968.1074989
8. Dubrovskii V. A., Tsikin B. G. O vozmozhnosti nakopleniya izlucheniya OKG, rasseyannogo electronnym potokom [On the possibility of accumulation of scattering radiation on an electrons flow in an optical quantum generator]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1972, no. 7, pp. 1433–1439 (in Russian).



9. Dubrovskii V. A., Lerner N. B., Tsikin B. G. On the Compton laser theory. *Kvant. Elektronika* [Quantum Electronics], 1975, vol. 2, pp. 2292–2302 (in Russian).
10. Soloviev A. P., Tsikin B. G. Stimulirovanie medlennoi elektromagnitnoi volnoi rasseyaniya izlucheniya OKG elektronnyim potokom [Stimulation of scattering by electrons flow radiation using a slow electromagnetic wave]. *Pis'ma v JTF* [Sov. JTF Lett.], 1977, vol. 3, pp. 307–309 (in Russian).
11. Dubrovskii V. A., Tsikin B. G. Stimulation of scattering in the Compton-laser by decelerated waves (semiclassical theory). *Kvant. Elektronika* [Quantum Electronics], 1977, vol. 4, pp. 1473–1481 (in Russian).
12. Zaretskii D. F., Nersesov E. A., Fedorov M. V. Gain in a Compton laser. *Sov. Phys. JETP*, 1981, vol. 53, pp. 508–512.
13. Fedorov M. V., Nersesov E. A., Zaretskii D. F. On the possibility to optimize the gain of the Compton laser. *Phys. Lett.*, 1981, vol. 82 A, pp. 227–228. DOI: 10.1016/0375-9601(81)90192-4.
14. Gover A., Yariv A. Collective and Single-Electron Interaction of Electron Beam with Electromagnetic Waves, and Free-Electron Lasers. *Appl. Phys.*, 1978, vol. 16, pp. 121–138.

Cite this article as:

Anikin V. M., Tsoy V. I. Physics of Free-electron Lasers in Saratov State University. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 144–148 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-144-148.



УДК 001.8

«ВВЕСТИ В ДЕЙСТВИЕ ДО ОБНАРОДОВАНИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВУЮЩИМ СЕНАТОМ» (К ИСТОРИИ УЧРЕЖДЕНИЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА)



В. М. Аникин

Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, декан, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, AnikinVM@info.sgu.ru

Анализируется полный выверенный текст постановления Временного правительства России от 1 (14) июля 1917 г. из газеты «Вестник Временного правительства» от 23 июля (5 августа) 1917 г. об учреждении в Саратовском университете физико-математического факультета. Приведены основные вехи биографии подписавшего постановление товарища министра народного просвещения Павла Ивановича Преображенского (1874–1944), талантливого администратора, научного работника и геолога, открывшего крупные месторождения калийно-магниевого солей и нефти в Волго-Уральском бассейне в конце 1920-х гг. Отмечается поддержка Саратовской городской думой структурного развития университета.

Ключевые слова: Саратовский университет, физико-математический факультет, Павел Иванович Преображенский, Александр Аполлонович Мануйлов, Михаил Федорович Волков.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-149-157

«Вести в действие»

Предыстории открытия в 1917 г. и истории последующего развития в 1917–1945 гг. физико-математического факультета Саратовского университета посвящена статья [1]. Сейчас остановимся более подробно на официальном решении о создании факультета.

Постановление об учреждении факультета было опубликовано в газете «Вестник Временного правительства» от 23 июля (5 августа) 1917 г., № 112 (158). Интересно обратить внимание на некоторые особенности названного номера газеты. Они позволяют, во-первых, установить точную дату (по старому и новому стилю) состоявшегося решения об открытии новых факультетов в Саратовском и Томском университетах – с 1 (14) июля 1917 г., и, во-вторых, назвать людей, непосредственно поставивших подписи под постановлением: это министр-председатель Временного правительства первого состава князь Георгий Евгеньевич Львов и товарищ министра народного просвещения Павел Иванович Преображенский (пост министра в первом составе правительства занимал профессор-экономист А. А. Мануйлов, бывший ректор Московского университета).

И еще такая любопытная деталь: газета с постановлением от 1 июля 1917 г. вышла в свет 23 июля 1917 г., когда у власти находился уже второй (!) состав Временного правительства, в котором министром-председателем был А. Ф. Керенский, а министром народного просвещения – академик-востоковед С. Ф. Ольденбург. Эту политическую ситуацию газета как раз и отражает: материалы с решениями Временного правительства на первой странице подписаны и Львовым, и Керенским.



Выходные данные газеты «Вестник Временного правительства» с постановлением об учреждении физико-математического факультета Саратовского университета



Постановление о Саратовском университете завершается энергичной фразой, подчеркивающей срочность вступления его в силу: «Ввести в действие настоящее постановление до обнародования его Правительствующим Сенатом»¹.

В приложении к настоящей статье приводится полный текст (в современной орфографии) исторического для Саратовского университета документа, точно воспроизводящего публика-

¹ Закон об открытии Саратовского университета в 1909 г. имел утвердительную резолюцию царя: «Быть по сему».

цию в «Ведомостях Временного правительства». Первым пунктом этого постановления фиксировалась дата открытия новых факультетов в Саратовском и Томском университетах. Вторым пунктом постановления определялся общий регламент работы новых факультетов, включая порядок проведения испытаний на «возведение в степень» магистра или доктора, а также избрания на должности ординарного и экстраординарного профессора. Поскольку для физико-математического факультета была одновременно сформирована структура посредством включения в него



Фрагмент первой страницы газеты «Вестник Временного правительства» за 23 июля (5 августа) 1917 г., на которой размещено постановление об учреждении новых факультетов в Саратовском и Томском университетах



ряда кафедр функционировавшего медицинского факультета, разрешалось самостоятельно избрать декана нового факультета. Профессоров же и деканов параллельно образуемых факультетов (историко-филологического и юридического) назначало Министерство народного просвещения. В Саратове первым деканом физико-математического факультета стал Владимир Дмитриевич Зёрнов [2]. Последующими пунктами постановления (третьим, четвертым и пятым) определились финансовые условия работы новых факультетов.

Товарищ министра П. И. Преображенский

Естественный вопрос: почему постановление о преобразовании структуры двух российских университетов подписал не сам министр А. А. Мануйлов, а его заместитель П. И. Преображенский? Это могло быть связано с распределением обязанностей в тогдашнем Министерстве народного просвещения. Павел Иванович Преображенский (1874–1944) исполнял специфические обязанности товарища министра по *профессиональному образованию*. Он был уважаем и в дореволюционное, и в советское время. А между этими периодами побывал на постах товарища министра и министра просвещения в ... Омском правительстве адмирала А. В. Колчака. Эпизоды биографии П. И. Преображенского свидетельствуют о неза-

урядности его личности и жизненного пути (см. [3] и ссылки на документальные материалы в [4]).

Родившийся в 1874 г. в семье священника, П. И. Преображенский окончил гимназию в Ташкенте с золотой медалью и в 1894 г. поступил на физико-математический факультет Московского университета. Но стал он не физиком, а геологом, через год переехав на учебу в Горный институт в Петербурге. Институт окончил в 1900 г. и получил звание горного инженера. С 1900 по 1917 г. (по приглашению профессора В. А. Обручева) он принимал участие в геологических исследованиях в золотоносных районах Восточной Сибири, а также вел преподавательскую деятельность. В послереволюционные годы занимал административные посты, вел научную и преподавательскую работу, успешно занимался геологическими изысканиями соляных месторождений в Прикамском регионе. 5 октября 1925 г. им было открыто крупнейшее в мире Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, а в 1929 г. – месторождение нефти на р. Чусовой (Верхнечусовские городки). Кстати, находка первой уральской нефти, приведшая к последующему открытию Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, является классическим примером так называемой серендипности (незапланированной удачи): искали границу соляного месторождения, а обнаружили нефтяные запасы!



Г. Е. Львов



А. А. Мануйлов



П. И. Преображенский

В 1935 г. П. И. Преображенскому без защиты была присуждена ученая степень доктора геолого-минералогических наук. В его честь назван минерал из группы водных боратов – «преображенскит» $Mg_3B_{10}O_{18} \cdot 4.5H_2O$. Он считается автором методики поисков и разведки

соляных месторождений, создателем русской школы геологов-солевикумов. Кроме деятельности в Пермской области, занимался практическими работами в Башкирии, Киргизии, Казахстане, Украине, Сибири. Биографию П. И. Преображенского можно найти не только в Большой



советской энциклопедии, но и в Википедии, Интернет-энциклопедиях Новгородской области, Пермского края, Сибири, в Информационной системе «История геологии и горного дела, Музея пермской нефти [4]².

Как считал В. А. Обручев, залогом успеха П. И. Преображенского как ученого и геолога являлось то, что он любил работать в поле и претворять свои идеи в полезное дело, при этом всякое препятствие в природе и в людях возбуждали его энергию; выручало Павла Ивановича и чувство юмора, которым он обладал в большой степени.

Министр народного просвещения А. А. Мануйлов

Подписание постановления Временного правительства об учреждении новых факультетов в Саратовском и Томском университетах произошло, как это было отмечено выше, в последние дни работы первого состава правительства. Министром народного просвещения с 2(15) марта по 2(15) июля 1917 г. был профессор Александр Аполлонович Мануйлов (1861–1929), ректор Московского университета в 1905–1911 гг. (см. биографию в [5]). Управляющий делами Временного правительства В. Д. Набоков в воспоминаниях [6] дал такую оценку деятельности Мануйлова-министра³:

«Специальная его деятельность в качестве министра народного просвещения не отличалась той авторитетностью, которой можно было от

него ожидать. Очень возможно, что это была не его вина – не вина его личных качеств. При других, более нормальных условиях эти качества сделали бы из него образцового министра просвещения, так как не может быть сомнения ни в его широких взглядах, ни в его больших знаниях, ни в общих положительных сторонах его как политика и администратора. Но, по существу, он не был боевой натурой, борцом. Он и раньше главным методом борьбы избирал подачу в отставку... Это, может быть, было правильно при Кассо, но здесь, в данный момент, требовалось что-то другое».

Набоков здесь напоминает об отставке А. А. Мануйлова в разгар студенческих волнений в 1911 г., вызванной его нежеланием или отсутствием возможностей выполнить Постановление Совета министров России от 11 января 1911 г. «О недопущении в стенах высших учебных заведений студенческих собраний и вменении в обязанность полицейским чинам принимать быстрые и решительные меры против них». Министр народного просвещения Л. А. Кассо тогда не просто принял отставку А. А. Мануйлова с поста ректора, а уволил его из университета, хотя тот избирался на свои должности на Совете университета. Это было расценено частью профессуры университета как нарушение автономного статуса учебного заведения, и университет в знак протеста покинули 130 человек, в том числе около 20 профессоров.

Не обошлось тогда и без серьезных личных трагедий. Так, страдавший острым сердечным заболеванием профессор Петр Николаевич Лебедев, создавший к тому времени в Московском университете замечательную научную школу по физике и сделавший много полезного для Физического института Саратовского университета, после мучительных раздумий вынужден был не только уйти (в знак солидарности) с поста профессора, но и покинуть квартиру в здании физической лаборатории, которую он занимал по причине своего болезненного состояния [7, 8]. За короткий срок Московский университет лишился квалифицированной части преподавателей, которые перешли работать в Московский городской народный университет А. Л. Шанявского (открыт в 1908 г. в Москве на средства генерала русской армии Альфонса Леоновича Шанявского), в Московский коммерческий институт, а также на Московские высшие женские курсы...

Неожиданное продолжение истории 1911 г. с отставками и увольнениями преподавателей

² Эпизод со службой в правительстве А. В. Колчака, конечно, даром для Преображенского не прошел. Он дважды арестовывался в 1920 г., но уже 23 июня 1920 г. был назначен заместителем заведующего отделом народного образования Сибревкома и председателем Сибирского комитета профессионально-технического образования! Так Председатель Совета Народных Комиссаров В. И. Ленин отреагировал на телеграмму А. М. Горького: «Ходатайствую о смягчении участи Преображенского, крупного геолога, нужного стране». Дальнейшая карьера П. И. Преображенского: в 1921–1924 гг. он работал в Пермском университете на должностях профессора, заведующего кафедрами геологии и минералогии, деканом агрономического факультета; одновременно в эти же годы преподавал в Горном институте в Екатеринбурге, где основал кафедру геологии полезных ископаемых; проводил геологические работы в районе р. Чусовой. С осени 1924 г. – на работе в Ленинграде в Главном геологоразведочном управлении и Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте. В 1937–1941 гг. – главный геолог, в 1941–1943 гг. – и.о. директора Всесоюзного научно-исследовательского института галургии в Ленинграде. Награжден двумя орденами – Трудового Красного Знамени (1932) и «Знак Почёта» (1944).

³ В начале министерской карьеры Мануйлова, как пишет Набоков, «все приветствовали это назначение». А. А. Мануйлов – автор первого воззвания Временного правительства.



Московского университета последовало в 1917 г., когда, будучи уже министром Временного правительства, А. А. Мануйлов 14 марта 1917 г. [9, с. 323] издал распоряжение, по которому уволенные или ушедшие при министре Л. А. Кассо профессора могли возвратиться на свои прежние посты. А в мае ректорам вузов было предложено «уволить с профессорских должностей всех лиц, назначенных до 27 августа 1905 г. без представления факультетов и советов» [5, с. 126]. Соответственно из Московского университета начался новый отток преподавателей, освобождавших места ранее ушедшим и теперь возвращающимся...

В такую «переделку» попал, например, выдающийся саратовский химик, профессор Владимир Васильевич Челинцев (1887–1947). С 10 июля 1910 г. он был назначен исполняющим обязанности профессора по кафедре химии Саратовского университета (он ходатайствовал об устройстве в Саратовский университет одновременно с В. Д. Зёрновым). Но 16 января 1912 г. В. В. Челинцев был перемещен в Московский университет на должность исполняющего обязанности экстраординарного профессора и заведующего лабораторией органической и аналитической химии. Спустя же пять лет, после распоряжения А. А. Мануйлова, он был вынужден вернуться в Саратов.

Впрочем, последующий период жизни и деятельности В. В. Челинцева «был отмечен наиболее пышным расцветом всех граней личности этого замечательного человека, ученого и педагога» [9, с. 323]. Он создал в Саратовском университете научную школу химиков-органиков, внес огромный вклад в развитие химической промышленности Поволжья. 1 февраля 1933 г. В. В. Челинцев был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР по отделению математических и естественных наук (органическая химия). В 1935 г. ему было присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки РСФСР.

Что же касается советского периода жизни А. А. Мануйлова, то он, после некоторых неурядиц, благополучно завершившихся после личного обращения к знавшему его труды В. И. Ленину, будучи авторитетом в области экономики, доктором наук (1901), в 1921–1928 гг. занимал пост члена Правления Госбанка РСФСР и СССР. В наши дни (в 2012 г.) была переиздана одна из его книг [10]⁴.

⁴ Один из сыновей А. А. Мануйлова, Аполлон Александрович, был скульптором. Он автор памятника А. С. Грибоедову в Москве (1959). Другой известный монумент скульптора, созданный вместе с женой Ольгой Максимилиановной, – памятник генерал-майору И. В. Панфилову, уроженцу г. Петровска Саратовской области, установлен в 1942 г. в г. Фрунзе (ныне – Бишкек).

Саратовская городская дума и Саратовский университет

Описанная в [1] деятельность руководства Саратовского университета по открытию новых факультетов активно поддерживалась Саратовской городской думой. Особую роль сыграл Михаил Федорович Волков, врач по образованию, бывший долгие годы гласным городской думы (в октябре 1913 г. его единодушно избрали городским головой). В 1909 г. он был в числе особой депутации, преподнесшей императору Николаю Второму благодарственный адрес и золотую медаль в связи с учреждением университета в Саратове (такую же медаль тогда вручили Председателю совета министров России П. А. Столыпину). В своих воспоминаниях [11] под красноречивым названием «История учреждения Саратовского университета и Саратовская городская дума. 1 декабря 1906 г. – 6 декабря 1909 г.» М. Ф. Волков рассказал, в частности, о своем визите к министру народного просвещения Л. А. Кассо в марте 1912 г. Во время аудиенции М. Ф. Волков пытался узнать у министра перспективу ходатайства Саратова об открытии в 1913 г. физико-математического факультета с агрономическим отделением «с расширенной программой». Л. А. Кассо ответил, что «организация медицинского факультета не закончена, пока только три курса, думать о следующих факультетах еще рано. У правительства есть другие заботы с учреждением и организацией высших учебных заведений в других городах. Так, Томск ждет 30 лет физико-математического факультета». М. Ф. Волков, как он пишет в воспоминаниях, в ответ пожелал Томскому университету всякого терпения, но повторил, что ему Саратовская дума поручила ходатайствовать о Саратовском университете...

При сменившем Л. А. Кассо на посту министра народного просвещения П. Н. Игнатьеве положительное мнение об открытии в Саратовском университете физико-математического факультета было сформировано [1], но «лавры» радетелей российского высшего образования достались Временному правительству.

Кстати, мечта М. Ф. Волкова о сельскохозяйственном подразделении в Саратовском университете осуществилась в 1918 г., когда решением Коллегии Народного Комиссариата просвещения действовавшие с 1913 г. Саратовские высшие сельскохозяйственные курсы были преобразованы в агрономический факультет университета. А 4 июня 1920 г. на III Всероссийском съезде по селекции и семеноводству,



в Большой физической аудитории Физического института Саратовского университета профессор Николай Иванович Вавилов выступил с докладом

«Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости», который мгновенно сделал его классиком биологической науки...



Михаил Федорович Волков
(1853–1934) [11]



Ректор Саратовского университета В. Д. Зёрнов и заведующий кафедрой частного земледелия и селекции Н. И. Вавилов среди делегатов III Всесоюзного съезда по селекции и семеноводству, июнь 1920 г.

Вместо заключения

Открытый 100 лет назад физико-математический факультет Саратовского университета сыграл выдающуюся роль в промышленном и культурном развитии Поволжского региона. Факультет менялся вслед за изменениями парадигмы университетского образования. В частности, выпускники-физики в 1950–1980-е гг. обеспечили превращение Саратова в «электронную столицу» СССР, сделали крупный вклад в развитие атомной промышленности страны, составили кадровый костяк открытых в 1980-х годах в Саратове академических институтов [12–15]. Физический факультет – основной «поставщик» преподавательских кадров в области физики для средних общеобразовательных, средних специальных и высших учебных заведений. В последнее время научно-образовательная деятельность физического факультета часто носит междисциплинарный и межфакультетский характер, осуществляется в рамках многочисленных научных грантов, к которым в последние годы прибавились мегагранты, выполняемые с участием ведущих зарубежных учёных.

Список литературы

1. Аникин В. М. Физико-математический факультет Саратовского университета (1917–1945) // Изв. Сарат. ун-та.

Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 1. С. 64–79. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-1-64-79

2. Зёрнов В. Д. Записки русского интеллигента. М. : Изд-во «Индрик», 2005. 400 с.
3. Павел Иванович Преображенский // Профессора Пермского государственного университета. Пермь : Изд-во Перм. ун-та, 2001. С. 158, 159.
4. Преображенский Павел Иванович. URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Преображенский,_Павел_Иванович (дата обращения: 01.05.2018).
5. Хотеев В. «Уравновешенная натура духовного европейца» (министр народного просвещения А. А. Мануйлов) // Высшее образование в России. 2002. № 3. С. 118–132.
6. Набоков В. Д. Временное правительство // Наше наследие. 1990. № 6. С. 69, 70.
7. Феномен научной школы : история, типология получения и передачи знаний, психология коммуникаций / В. М. Аникин, Б. Н. Пойзнер, Э. А. Соснин, А. В. Шувалов ; под общ. ред. В. М. Аникина. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2015. 232 с.
8. Аникин В. М. «Фабрика молодых физиков» П. Н. Лебедева и Саратовский университет // УФН. 2016. Т. 186, вып. 2. С. 169–173.
9. Аврус А. И., Саунин И. В., Соломонов В. А. Саратовцы – академики и члены-корреспонденты Российской академии наук : библиографические очерки. Саратов : Изд-во «Сателлит», 2005. 366 с.
10. Мануйлов А. А. Понятие ценности по учению экономистов классической школы : Смит, Рикардо и их ближайшие последователи. М. : URSS ; ЛИБРОКОМ, 2012. 226 с.



11. Волков М. Ф. История учреждения Саратовского университета и Саратовская городская дума. 1 декабря 1906 г. – 6 декабря 1909 г. : Воспоминания и заметки / [сост. В. В. Критский]; Мин-во культуры Саратов. обл., Саратов. обл. музей краеведения. Саратов : Изд-во «Новый ветер», 2015. 232 с.
12. Аникин В. М. «Приобретать умение делать физические измерения и исследования» : к 100-летию физического образования и физической науки в Саратове // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 53–58.
13. Аникин В. М. Физический факультет в XXI веке. К 70-летию физического факультета Саратовского университета // Там же. Вып. 2. С. 65–71.
14. Усанов Д. А., Аникин В. М. Саратовские научные и педагогические школы по физике (к 80-летию образования Саратовской области) // Там же. 2016. Т. 16, вып. 3. С. 178–190. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-3-178-190
15. Аникин В. М. Послесловие к юбилею физического факультета СГУ // Там же. Вып. 4. С. 248–252. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-248-252

Приложение

ВЕСТНИК ВРЕМЕННОГО ПРАВИТЕЛЬСТВА
№ 112 (158). Воскресенье, 23 июля (5 августа) 1917 года

Постановление Временного правительства

I. Учредить с 1-го июля 1917 года в составе Саратовского университета факультеты: физико-математический, историко-филологический и юридический и в составе Томского университета: физико-математический и историко-филологический.

II. Распространить на означенные в отделе I факультеты, впредь до издания нового устава и штата российских университетов, действие общего устава университета 23 августа 1884 г. (2404), с последовавшими к ним дополнениями и изменениями, а также с соблюдением нижеследующих правил:

1. Положенные ныне для медицинского факультета Саратовского и Томского университетов кафедры: 1) физики с физической географией и метеорологией, 2) химии органической и неорганической, 3) минералогии с геологией и палеонтологией, 4) ботаники, 5) зоологии с сравнительной анатомией – включаются в состав учреждаемого физико-математического факультета. Профессорам, занимающим означенные кафедры, предоставляется избрать первого декана, а равно первоначальный состав профессоров по прочим положенным для физико-математическим факультета кафедрам.

2. Первоначальный состав профессоров историко-филологических факультетов в Саратовском и Томском университетах и юридического факультета Саратовского университета, а равно первые деканы сих факультетов избираются министром народного просвещения.

3. Временно, в течение пяти лет со дня введения в действие настоящего постановления, к исправлению должностей экстраординарных профессоров в означенных в отделе I факультетах могут быть избираемы лица, выдержавшие испытания на степень магистра и преподававшие в звании приват-доцента одного из российских университетов не менее трех лет, причем сокращение этого срока допускается в порядке, указанном в статье 499 уставов ученых учреждений и учебных заведений (св. зак. т. XI, ч. 1. изд. 1893 г.). В течение того же срока к исправлению должностей ординарного или экстраординарного профессоров могут быть избираемы русские ученые, имеющие степень доктора одного из иностранных университетов и известные своими учеными трудами, а также преподавательскою деятельностью в сих университетах.

4. Производство на означенных в отделе I факультетах испытаний на ученые степени магистра или доктора и возведение в означенные степени предоставляется совету и названным факультетам лишь после полного сформирования их в составе всех курсов.

5. Министру народного просвещения, по ходатайствам факультетов, предоставляется, по соглашению с министром финансов и государственным контролером, испрашивать ежегодно кредиты на командировки с научною целью профессоров означенных в отделе I университетов, прослуживших в университете не менее двух лет, на срок от одного до двух полугодий.

6. Получивший указанную в предыдущей (5) статье командировку, сохраняя всё причитающееся по занимаемой им должности содержание, сверх того, получает одновременно не свыше полугодового оклада основного содержания, но зато не пользуется другими видами командировочного довольствия, установленными уставом о службе по определению от Правительства (св. зак. т. III).



III. Отпустить из средств государственного казначейства в 1917 году на первоначальное устройство и содержание означенных в отделе I факультетов университетов *сто шестьдесят три тысячи сто рублей*, а, начиная с 1918 года, размер кредитов, потребных на содержание названных факультетов, определять в сметном порядке, в мере действительной надобности и применительно к действующему штату университетов.

IV. Отпустить из средств государственного казначейства в 1918 году на первоначальное научное оборудование кафедр означенных в отделе I факультетов *сто тридцать шесть тысяч рублей*, в том числе: физико-математического – по 48.000 рублей, историко-филологического – по 15.000 рублей и юридического – по 10.000 рублей, а, начиная с 1919 года, определять размер необходимого на ту же надобность кредита в сметном порядке, в мере их действительной надобности.

V. Предоставить министру народного просвещения испрашивать, начиная с 1918 года, кредиты, потребные на окончание работ по сооружению и оборудованию зданий медицинского факультета, а равно на сооружение и оборудование зданий для прочих факультетов Саратовского университета и на сооружение и оборудование зданий новых факультетов Томского университета в сметном порядке, в мере действительной надобности.

VI. Ввести в действие настоящее постановление до обнародования его Правительствующим Сенатом.

Подписали: Министр-председатель князь Львов.
За министра народного просвещения П. Преображенский.
1-го июля 1917 года

Образец для цитирования:

Аникин В. М. «Ввести в действие до обнародования Правительствующим Сенатом» (К истории учреждения физико-математического факультета Саратовского университета) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 149–157. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-149-157.

“Enter into Action before Declaration by Governing Senate” (On the History of the Establishment of the Faculty of Physics and Mathematics at Saratov State University)

V. M. Anikin

Valery M. Anikin, ORCID 0000-0002-6506-6997, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, AnikinVM@info.sgu.ru

The full verified text of the Decree of the Provisional Government of Russia dated July 1 (14), 1917, from the newspaper “Newsletter of the Provisional Government” dated July 23 (August 5), 1917, about the establishment of the Faculty of Physics and Mathematics at the Saratov University is analyzed. The main milestones of the biography of Pavel Ivanovich Preobrazhensky (1874–1944), are given. He was Deputy Minister of public education, a talented administrator, scientist and geologist, who opened the major place-birth of potassium-magnesium salts and oil in the Volga-Ural basin in the late 1920s years. The support of the Saratov City Duma for structural development of the University is noted.

Keywords: Saratov University, Faculty of Physics and Mathematics, Pavel I. Preobrazhensky, Alexander A. Manuylov, Mikhail F. Volkov.

References

1. Anikin V. M. Faculty of Physics and Mathematics of Saratov State University (1917–1945). *Izv. Saratov Univ.*

(N. S.), *Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 1, pp. 64–79 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-1-64-79

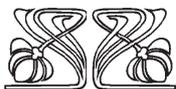
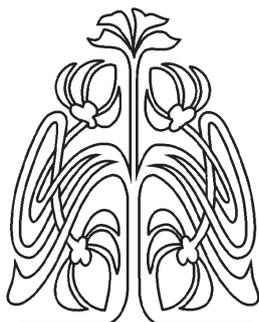
- Zernov V. D. *Zapiski russkogo intelligenta* [Notes of the Russian Intelligent]. Moscow, Izd-vo “Indrik”, 2005. 400 p. (in Russian).
- Pavel Ivanovich Preobrazhensky. *Professora Permskogo universiteta (1916–2001)* [Professors of Perm’ University]. Perm’, Izd-vo Permskogo un-ta, 2001, pp. 158, 159 (in Russian).
- Preobrazhensky Pavel Ivanovich. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Preobrazhensky__Pavel_Ivanovich (accessed 23 February 2018) (in Russian).
- Khoteyenkov V. «Uravnoveshennaya natura dukhovno yevropeytsa» (ministr narodnogo prosveshcheniya A. A. Manuylov) [«The Balanced Nature of a Spiritual European» (Minister of Education A. A. Manuylov)]. *Higher Education in Russia*, 2002, no. 3, pp. 118–132 (in Russian).
- Nabokov V. D. *Vremennoye pravitel’sтво* [Provisional Government], *Our Heritage*, 1990, no. 6, pp. 69, 70 (in Russian).
- Anikin V. M., Poizner B. N., Sosnin E. A., Shuvalov A. V. *Fenomen nauchnoj shkoly: istoriya, tipologiya poluchenija i peredachi znaniy, psihologiya kommunikacij* [The phenomenon of the scientific school: history, typology of the receipt and transmission of knowledge, communication psychology]. Ed. V. M. Anikin. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2015. 232 p. (in Russian).



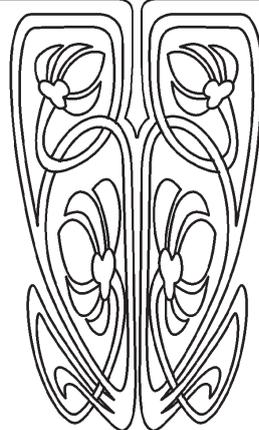
8. Anikin V. M. P. N. Levedev's «Factory of Young Physicists» and Saratov University. *Phys. Usp.*, 2016, vol. 59, iss. 2, pp. 162–166. DOI: 10.3367/UFNe.0186.201602e.0169
9. Avrus A. I., Saunin I. V., Solomonov V. A. *Saratovcy – akademiki i chleny-korrespondenty Rossijskoj akademii nauk: Biobibliografi cheskie ocherki* [Saratovites – academicians and corresponding members of the Russian Academy of Sciences: Biographic & Bibliographic essays]. Saratov, Izd-vo “Satellit”, 2005. 366 p. (in Russian).
10. Manuylov A. A. *Ponyatiye tsennosti po ucheniyu ekonomistov klassicheskoy shkoly: Smit, Rikardo i ikh blizhayskiye nasledovateli* [The concept of value according to the teachings of the economists of the classical school: Smith, Ricardo and their closest followers]. Moscow, URSS, LIBROKOM, 2012. 226 p. (in Russian).
11. Volkov M. F. *Istoriya uchrezhdeniya Saratovskogo universiteta i Saratovskaya gorodskaya дума. 1 dekabrya 1906 g. – 6 dekabrya 1909 g. : Vospominaniya i zametki. Sost. V. V. Kritsky* [History of the institution of the Saratov University and the Saratov City Duma. December 1, 1906 – December 6, 1909 : Memoirs and notes]. Saratov, Ministry of Culture of the Saratov Region, Saratov Regional Museum of Local History; comp. V. V. Kritsky. Saratov, Izd-vo “Novy veter”, 2015. 232 p. (in Russian).
12. Anikin V. M. “To get the ability to do the physical dimension and research”. A Centenary of physical education and science in Saratov. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2014, vol. 14, iss. 1, pp. 53–58 (in Russian).
13. Anikin V. M. Faculty of Physics in the 21st Century. To the 70th Anniversary of the Faculty of Physics of the Saratov University. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2014, vol. 14, iss. 2, pp. 65–71 (in Russian).
14. Usanov D. A., Anikin V. M. Scientific and Educational Physical Schools in Saratov (on the 80th Anniversary of the Saratov Region). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 3, pp. 178–190 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-3-178-190
15. Anikin V. M. Afterword to the Anniversary of the faculty of Physics of SSU. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 248–252 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-248-252

Cite this article as:

Anikin V. M. «Enter into Action before Declaration by Governing Senate» (On the History of the Establishment of the Faculty of Physics and Mathematics at Saratov State University). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 149–157 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-149-157.



ПОДПИСКА



Подписка на II полугодие 2018 года

Индекс издания в объединенном каталоге
«Пресса России» 36015, раздел 30
«Научно-технические издания.
Известия РАН. Известия вузов»

Журнал выходит 4 раза в год

Цена свободная

Оформить подписку онлайн можно
в интернет-каталоге «Пресса по подписке» (www.akc.ru)

Адрес Издательства

Саратовского университета:

410012, Саратов, Астраханская, 83;

Тел.: +7 (845-2) 51-45-49, 52-26-89

Факс: +7 (845-2) 27-85-29

E-mail: izvestiya@sgu.ru

Адрес редколлегии серии:

410012, Саратов, Астраханская, 83,

СГУ имени Н. Г. Чернышевского,
физический факультет

Тел./факс: +7 (845-2) 51-14-30

E-mail: fizika.sgu@bk.ru

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