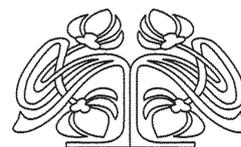




Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

# ИЗВЕСТИЯ

САРАТОВСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
Новая серия



Научный журнал  
2016 Том 16  
ISSN 1814-733X  
ISSN 1817-3020  
Издается с 2001 года

Серия Физика, выпуск 4

Продолжение «Известий Императорского Николаевского Университета» 1910–1918 и «Ученых записок СГУ» 1923–1962

## СОДЕРЖАНИЕ

### Научный отдел

#### Радиофизика, электроника, акустика

**Семенова Н. И., Галактионова Т. И., Анищенко В. С.**

Возвраты Пуанкаре и размерность Афраймовича–Песина  
в неавтономном консервативном осцилляторе

195

#### Физика атомного ядра и элементарных частиц

**Белоусов А. В., Белянов А. А., Черняев А. П.**

Расчет и аппроксимация радиальной дозовой функции  
иридиевых источников

203

#### Физика конденсированного состояния вещества

**Мадатов Р. С., Алекперов А. С., Набиев А. Э.**

Влияние примесных атомов  $Sm$  на эффект переключения  
в тонких пленках  $GeS$

212

#### Биофизика и медицинская физика

**Бокарев А. Н., Пластун И. Л., Агандеева К. Е.**

Влияние водородной связи на ИК-спектры и структуру  
молекулярного комплекса алмазоподобных  
наночастиц и азотистых оснований ДНК

218

**Хорев В. С., Киселев А. Р., Шварц В. А.,**

**Лапшева Е. Е., Пономаренко В. И.,**

**Прохоров М. Д., Гриднев В. И., Караваев А. С.**

Исследование запаздывания в связи между контурами  
регуляции сердечно-сосудистой системы у здорового человека  
методом моделирования фазовой динамики

227

### Методический отдел

**Черняев А. П., Близинок У. А., Борщеговская П. Ю.,**

**Варзарь С. М., Розанов В. В., Крусанов Г. А., Белянов А. А.**

Подготовка медицинских физиков для клинических баз  
в Московском государственном университете  
имени М. В. Ломоносова

238

**Черкасова О. А., Чурочкина С. В.**

Характеристики выпускной квалификационной работы  
бакалавра, магистранта и аспиранта

243

### Приложения

#### Хроника

**Аникин В. М.**

Послесловие к юбилею физического факультета СГУ

248

Журнал включен в Перечень рецензи-  
руемых научных изданий, в которых  
должны быть опубликованы основные  
научные результаты диссертаций на  
соискание ученой степени кандидата  
наук, на соискание ученой степени  
доктора наук

Зарегистрировано в Министерстве  
Российской Федерации по делам  
печати, телерадиовещания и средств  
массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации СМИ  
ПИ № 77-7185 от 30 января 2001 года.  
Зарегистрировано в Федеральной  
службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и мас-  
совых 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 изда-  
ния. Известия РАН. Известия вузов».  
Журнал выходит 4 раза в год

#### Заведующий редакцией

Бучко Ирина Юрьевна

#### Редактор

Бучко Ирина Юрьевна

#### Художник

Соколов Дмитрий Валерьевич

#### Редактор-стилист

Степанова Наталия Ивановна

#### Верстка

Ковалева Наталья Владимировна

#### Технический редактор

Ковалева Наталья Владимировна

#### Корректор

Юдина Инна Геннадиевна

#### Адрес учредителя и редакции:

410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

Тел.: (845-2) 51-45-49, 52-26-89

E-mail: izvestiya@sgu.ru

Подписано в печать 21.12.2016.

Формат 60×84 1/8.

Усл. печ. л. 7,01 (7,75).

Тираж 500 экз. Заказ 170-Т.

Отпечатано в типографии  
Саратовского университета.

#### Адрес типографии:

410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский университет, 2016



## 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 16 страниц текста, 5 рисунков и 4 таблицы, объемом краткого сообщения – до 6 страниц текста, 2 рисунка и 2 таблицы. Таблицы не должны превышать 20% общего объема статьи.

На русском языке статья содержит: УДК, заглавие, инициалы и фамилии авторов, название их места работы, электронный адрес автора, с которым ведётся переписка, аннотацию (около 12 строк), ключевые слова (не более 15), текст, благодарности и ссылки на гранты, список литературы.

На английском языке необходимо продублировать: заглавие, инициалы и фамилии авторов, аннотацию, ключевые слова.

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, приложения, список литературы, примечания) – 12; все страницы рукописи, таблицы, рисунки, следует пронумеровать. Иллюстрации и таблицы представляются дополнительно отдельным файлом. Рисунки должны быть в формате TIFF, JPG, CDR, BMP с разрешением не меньше 300 dpi, в черно-белом виде. Нумерация источников в списке литературы должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте, ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Для публикации статьи необходимо представить в редакцию:

– подписанный авторами текст статьи, включая резюме и ключевые слова, таблицы, рисунки и подписи к ним (2 экз.);

– сведения об авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученые степень и звание, служебные адреса и телефоны, адреса электронной почты, указать автора, ответственного за переписку с редакцией (1 экз.);

– файлы всех вышеперечисленных материалов в форме документа Microsoft Word doc или Word docx;

– направление от организации (1 экз.);

– внешнюю рецензию, заверенную в установленном порядке.

Почтовый адрес редакции: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, физический факультет, журнал «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика», главному редактору.

Электронный адрес: fizika.sgu@bk.ru

Сайт журнала: fizika.sgu.ru

## CONTENTS

### Scientific Part

#### Radio Physics, Electronics, Acoustics

**Semenova N. I., Galaktionova T. I., Anishchenko V. S.**

Poincare Recurrences and Afraimovich–Pesin Dimension in a Nonautonomous Conservative Oscillator 195

#### Nuclear and Elementary Particle Physics

**Belousov A. V., Belianov A. A., Chernyaev A. P.**

Calculation and Approximation of Radial Dose Function of Iridium Sources 203

#### Physics of Condensed Matter

**Madatov R. S., Alekperov A. S., Nabiyeu A. E.**

Influence of  $S_m$  Impurity Atoms on the Switching Effect in Thin Films of GeS 212

#### Biophysics and Medical Physics

**Bokarev A. N., Plastun I. L., Agandeeva K. E.**

Influence of the Hydrogen Bond on the IR-spectrum and Structure of Molecular Complex of Diamond Nanoparticles and DNA Bases 218

**Khorev V. S., Kiselev A. R., Shvartz V. A.,**

**Lapsheva E. E., Ponomarenko V. I.,**

**Prokhorov M. D., Gridnev V. I., Karavaev A. S.**

Investigation of Delay Time in Interaction between the Regulatory Circuits in the Cardiovascular System of Healthy Humans Using Modeling of Phase Dynamics 227

### Methodological Part

**Chernyaev A. P., Bliznyuk U. A.,**

**Borschegovskaya P. Yu., Varzar S. M.,**

**Rozanov V. V., Krusanov G. A., Belyanov A. A.**

Training of Medical Physicists for Clinical Bases in Lomonosov Moscow State University 238

**Cherkasova O. A., Churochkina S. V.**

Characteristics of Final Qualifying Works by Bachelors, Masters and Postgraduates 243

### Appendices

#### Chronicle

**Anikin V. M.**

Afterword to the Anniversary of the Faculty of Physics of SSU 248



**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛОВ  
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ»**

**Главный редактор**

Чумаченко Алексей Николаевич, доктор геогр. наук, профессор (Саратов, Россия)

**Заместитель главного редактора**

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

**Ответственный секретарь**

Халова Виктория Анатольевна, кандидат физ.-мат. наук, доцент (Саратов, Россия)

**Члены редакционного совета:**

Балаш Ольга Сергеевна, кандидат экон. наук, доцент (Саратов, Россия)

Бучко Ирина Юрьевна, директор Издательства Саратовского университета (Саратов, Россия)

Данилов Виктор Николаевич, доктор ист. наук, профессор (Саратов, Россия)

Ивченков Сергей Григорьевич, доктор соц. наук, профессор (Саратов, Россия)

Коссович Леонид Юрьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Макаров Владимир Зиновьевич, доктор геогр. наук, профессор (Саратов, Россия)

Прозоров Валерий Владимирович, доктор филол. наук, профессор (Саратов, Россия)

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

Устьянцев Владимир Борисович, доктор филос. наук, профессор (Саратов, Россия)

Шамионов Раиль Мунирович, доктор психол. наук, профессор (Саратов, Россия)

Шляхтин Геннадий Викторович, доктор биол. наук, профессор (Саратов, Россия)

**EDITORIAL COUNCIL OF THE JOURNALS  
«IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. NEW SERIES»**

**Editor-in-Chief** – Chumachenko A. N. (Saratov, Russia)

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

**Executive Secretary** – Khalova V. A. (Saratov, Russia)

**Members of the Editorial Council:**

Balash O. S. (Saratov, Russia)

Buchko I. Yu. (Saratov, Russia)

Danilov V. N. (Saratov, Russia)

Ivchenkov S. G. (Saratov, Russia)

Kossovich L. Yu. (Saratov, Russia)

Makarov V. Z. (Saratov, Russia)

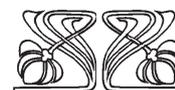
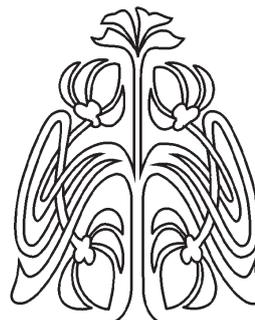
Prozorov V. V. (Saratov, Russia)

Usanov D. A. (Saratov, Russia)

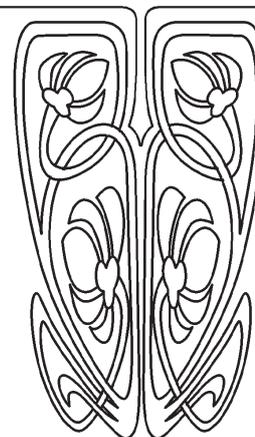
Ustiantsev V. B. (Saratov, Russia)

Shamionov R. M. (Saratov, Russia)

Shlyakhtin G. V. (Saratov, Russia)



**РЕДАКЦИОННЫЙ  
СОВЕТ**



**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)

Виницкий 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, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)

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

Кудряшов Валерий Павлович, доктор техн. наук (Саратов, Россия)

Кузнецов Сергей Петрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Лёвин Юрий Иванович, кандидат физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

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

Нефёдов Игорь Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник университета Аалто (Хельсинки, Финляндия)

Никитов Сергей Аполлонович, доктор физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)

Резчиков Александр Фёдорович, доктор техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)

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, профессор, 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)

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

Шиманский-Гайер Лутц, Ph.D, профессор Гумбольдтского университета (Берлин, Германия)

**РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ**

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

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

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

Tuchin V. V. (Saratov, Russia)

**Executive Secretary** – Skripal An. V. (Saratov, Russia)

**Members of the Editorial Board:**

Anikin V. M. (Saratov, Russia)

Babkov L. M. (Saratov, Russia)

Gorokhov A. V. (Samara, Russia)

Gribov L. A. (Moscow, Russia)

Davidovich M. V. (Saratov, Russia)

Filimonov Yu. A. (Saratov, Russia)

Khlebtsov N. G. (Saratov, Russia)

Kudryashov V. P. (Saratov, Russia)

Kuznetsov S. P. (Saratov, Russia)

Levin Yu. I. (Saratov, Russia)

Nefedov I. S. (Helsinki, Finland)

Nikitov S. A. (Moscow, Russia)

Melnikov L. A. (Saratov, Russia)

Rezchikov A. F. ((Saratov, Russia)

Schimanski-Geier L. (Berlin, Germany)

Sharaevsky Yu. P. (Saratov, Russia)

Skripal A. V. (Saratov, Russia)

Sukhorukov G. B. (London, UK)

Trubetskov D. I. ((Saratov, Russia)

Vadivasova T. E. (Saratov, Russia)

Vinitsky S. I. (Dubna, Russia)

Wenig S. B. (Saratov, Russia)



# РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

УДК 537.86

## ВОЗВРАТЫ ПУАНКАРЕ И РАЗМЕРНОСТЬ АФРАЙМОВИЧА–ПЕСИНА В НЕАВТОНОМНОМ КОНСЕРВАТИВНОМ ОСЦИЛЛЯТОРЕ

Н. И. Семенова<sup>1</sup>, Т. И. Галактионова<sup>2</sup>, В. С. Анищенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Семенова Надежда Игоревна, аспирант кафедры радиофизики и нелинейной динамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, [semenovani@info.sgu.ru](mailto:semenovani@info.sgu.ru)

<sup>2</sup>Галактионова Татьяна Игоревна, магистрант кафедры радиофизики и нелинейной динамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, [galaktozat@ya.ru](mailto:galaktozat@ya.ru)

<sup>3</sup>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](mailto:wadim@info.sgu.ru)

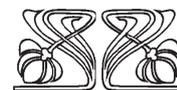
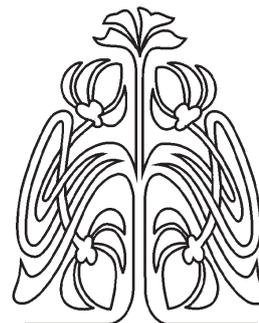
Одной из фундаментальных особенностей временной динамики является возврат Пуанкаре. Показано, что статистика времен возврата при глобальном подходе зависит от топологической энтропии  $h$ . Случай  $h > 0$  (множество с перемешиванием) уже был исследован теоретически, а выводы теории были подтверждены результатами численного моделирования. Случай  $h = 0$  (множество без перемешивания) также был исследован теоретически, но недавние результаты численного моделирования выявили некоторые расхождения с теорией. В частности, было получено, что зависимость средних минимальных времен возврата в окрестность размера  $\varepsilon$  в отображении окружности является ступенчатой функцией («Лестница Фибоначчи»). В данной работе методом численного анализа исследуются возвраты Пуанкаре на инвариантных кривых в стробоскопическом сечении неавтономного консервативного осциллятора при глобальном подходе. Получена ступенчатая зависимость среднего минимального времени возврата от размера  $\varepsilon$ -окрестности возврата («Лестница Фибоначчи»), а также найдены условия возникновения этой зависимости и влияние на нее амплитуды внешнего гармонического воздействия. Найдена размерность Афраймовича–Песина, как в случае рационального, так и иррационального отношения собственной и внешней частоты.

**Ключевые слова:** возвраты Пуанкаре, гамильтоновы системы, размерность Афраймовича–Песина, число вращения, «Лестница Фибоначчи», неавтономный консервативный осциллятор, множество без перемешивания, топологическая энтропия, золотое сечение, время возврата.

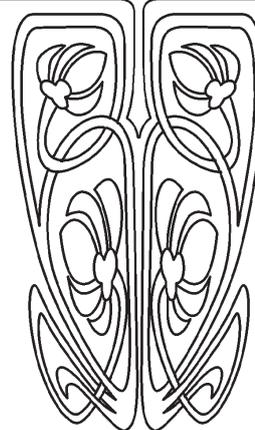
DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-195-203

### Введение

Как известно, динамические системы со сложным характером траекторий можно описывать с точки зрения геометрии предельных множеств в фазовом пространстве, а также с точки зрения эволюции фазовых траекторий во времени. Одной из фундаментальных особенностей временной динамики систем является возврат Пуанкаре. Возвращаемость по Пуанкаре означает, что практически любая траектория, стартующая из некоторой точки  $\vec{x}_0$  предельного множества, во времени бесконечное число раз пройдет сколь угодно близко от



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





начального состояния. Системы, обладающие таким свойством, называются устойчивыми по Пуассону. Для динамических систем с заданной мерой статистические характеристики времен возврата детально исследованы как теоретически [1, 2], так и с помощью численного эксперимента [3, 4].

Существует два подхода к расчетам возвратов Пуанкаре: локальный и глобальный. Идея локального подхода заключается в расчете возвратов Пуанкаре в некоторую  $\varepsilon$ -окрестность заданного начального состояния [2]. В случае же глобального подхода возвраты Пуанкаре рассчитываются для всего множества в целом, т.е. все множество разбивают на отрезки, квадраты или кубы (в зависимости от размерности системы) размером  $\varepsilon$ , и для каждого считается минимальное время возврата с последующим усреднением [3, 5, 6]. Одной из характеристик последовательности времен возврата при глобальном подходе является размерность Аффраймовича–Песина, которая была введена в статье [5].

Показано, что статистика времен возврата при глобальном подходе зависит от топологической энтропии  $h_T$ . Случай  $h_T > 0$ , т.е. множество с перемешиванием, уже был детально исследован теоретически [3, 5, 6], а выводы теории подтверждены результатами численных экспериментов [4, 7–9]. Что же касается множеств без перемешивания,  $h_T = 0$ , то здесь ситуация иная. В работах [3, 5, 6] были получены строгие теоретические результаты, которые были подтверждены численно и вскрыли ряд интересных особенностей [9, 10].

Рассмотрим их на примере отображения окружности:

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \Delta + K \sin \theta_n \pmod{2\pi}, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – параметр линейного сдвига на окружности,  $K$  – параметр нелинейности. При  $K = 0$  отображение (1) трансформируется в линейное отображение:

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \Delta \pmod{2\pi}, \quad (2)$$

в котором число вращения зависит от параметра  $\Delta$  как  $\rho = \Delta/2\pi$ . Число вращения в общем случае определяется как среднее приращение угла за одну итерацию, при этом расчет угла отображения в системах (1) и (2) осуществляется (без знака  $\pmod{2\pi}$ ) как

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\theta_n - \theta_0}{n}. \quad (3)$$

Для системы (2) было показано, что при иррациональном числе вращения  $\rho$  зависимость среднего минимального времени возврата Пуанкаре  $\langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle$  от размера области возврата  $\varepsilon$  представляет собой ступенчатую функцию (рис. 1), названную «Лестницей Фибоначчи» [10].

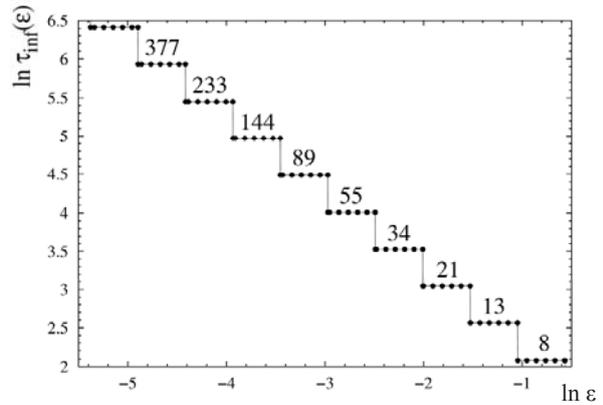


Рис. 1. Зависимость минимального времени возврата Пуанкаре от размера окрестности в отображении окружности при числе вращения  $\rho = \frac{1}{2}(\sqrt{5} - 1)$ , «Лестница Фибоначчи»

Стоит отметить, что среднее минимальное время возврата является одной из основных характеристик глобальной теории возвратов Пуанкаре. Для расчета  $\langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle$  множество фазовых траекторий покрывается ячейками элементарного объема  $\xi_i (i = 1, 2, \dots, N)$  размера  $\varepsilon$ . Далее, для каждого  $\xi_i$  вычисляется минимальное время возврата Пуанкаре  $\tau_{\text{inf}}(\xi_i)$ . После этого вычисляется  $\langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle$  как

$$\langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{\text{inf}}(\xi_i). \quad (4)$$

Доказано [3,5], что для линейного отображения окружности среднее минимальное время возврата Пуанкаре можно определить следующим образом

$$\langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle \sim \varepsilon^{-\frac{d}{\alpha_C}} \quad (5)$$

или

$$\ln \langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle \sim -\frac{d}{\alpha_C} \ln \varepsilon, \quad \varepsilon \ll 1, \quad d = 1,$$

где  $\alpha_C$  – размерность Аффраймовича–Песина, которая может быть вычислена как коэффициент угла наклона прямой  $\langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle$  от  $\ln \varepsilon$ .

Показано [10], что «Лестница Фибоначчи» обладает следующими свойствами.

1. Последовательность значений  $\langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle$  с уменьшением величины  $\varepsilon$  строго совпадает с последовательностью знаменателей, подходящих к числу вращения  $\rho$  дробей  $p_i/q_i (i = 1, 2, \dots)$ . На



рис. 1 представлен случай золотого сечения, т.е. когда число вращения  $\rho = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ . В этом случае

знаменателями подходящих дробей являются числа Фибоначчи. В случае серебряного сечения числом вращения является  $\rho = \sqrt{2} + 1$ , а в качестве подходящих дробей выступают числа Пелля.

2. При изменении величины  $\varepsilon$  в пределах любой из ступенек лестницы регистрируются три времени возврата:  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ , причем  $\tau_1 = \tau_{\text{inf}}$ . Это свойство следует из теоремы Слейтера [11].

3. В случаях золотого и серебряного сечений, для которых выполняется условие  $q_i = p_{i+1}$ , ширина и высота ступенек лестницы (см. рис. 1) определяются числом вращения и равны  $|\ln \rho|$ .

Отметим, что статистика возвратов численно исследована применительно к диссипативным эргодическим системам. Представляет интерес провести соответствующие расчеты применительно к консервативным системам.

В фазовом пространстве гамильтоновых систем могут существовать различные фрактальные объекты, сложность структуры которых отражает сложность поведения орбит [3]. По этой причине этот тип систем представляет собой интерес с точки зрения возвратов Пуанкаре. Гамильтоновы системы исследовались с точки зрения локальных возвратов Пуанкаре достаточно давно. В последнее время чаще встречаются работы с мультифрактальным анализом гамильтоновых систем [3, 6, 12, 13]. В основе этих работ лежит исследование вероятностного распределения времен возврата, полученных методом мультифрактального анализа [3]. Примерами гамильтоновых систем могут служить: модель Энно–Эйлеса [14], рассеивающие бильярды (бильярд Синая), ротатор, испытывающий периодические толчки [15], двойной маятник [16], а также некоторые отображения [3, 6].

### 1. Исследуемая система

В рамках данной работы нас будет интересовать статистика времен возврата Пуанкаре при глобальном подходе. Мы будем рассчитывать минимальные времена возврата Пуанкаре и размерность Афраймовича–Песина. Рассмотрим один из примеров гамильтоновой системы – математический маятник под внешним гармоническим воздействием (вынужденный маятник). Маятник описывается системой трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -\sin x + b \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= \Omega, \end{aligned} \quad (6)$$

где амплитуда колебаний маятника равна единице, а его частота  $\omega_0 = 1$ . Внешнее воздействие имеет амплитуду  $b$  и частоту  $\Omega$ . Фазовые траектории системы (6) расположены на поверхности двумерного тора. Поведение траекторий на торе сильно зависит от отношения частот  $\Omega/\omega_0$ . Если это отношение рационально, т.е.  $\Omega/\omega_0 = p/q$ , где  $p$  и  $q$  – целые числа, то через время  $T = 2\pi(p\Omega + q/\omega_0)$  траектория будет возвращаться в точку, из которой она вышла в момент времени  $t_0 = t - T$  (резонанс на торе). В случае иррационального отношения частот фазовая траектория не замыкается сама на себя и с течением времени будет всюду плотно покрывать поверхность тора без самопересечения (эргодический случай).

На рис. 2 представлены проекции фазовых траекторий системы (6) на  $xu$ -плоскость и соответствующие множества, полученные в стробоскопическом сечении системы (6), для нескольких значений амплитуды воздействия  $b$ . При малых значениях параметра  $b$  система (6) схожа с математическим маятником  $\ddot{x} = -\sin x$ . Фазовое пространство математического маятника двумерно, и для него осуществимо каноническое преобразование, с помощью которого можно перейти к переменным действие–угол:  $(\vec{q}, \vec{p}) \rightarrow (\vec{\alpha}, \vec{J})$ . В этом случае для описания динамики в пространстве  $(\vec{\alpha}, \vec{J})$  очень удобной оказывается полярная система координат, в которой величине  $\vec{J}$  ставится в соответствие расстояние от начала координат до некоторой точки фазового пространства, а величине  $\vec{\alpha}$  – угол. Движение при заданном  $\vec{J}$  представляет собой движение по окружности с радиусом  $J$ . Меняя радиус, получаем множество вложенных центрированных окружностей, которые полностью заполняют фазовое пространство такой системы (см. рис. 2). Скорость движения по каждой окружности в общем случае зависит от значения переменной действия  $\vec{J}$ , т.е.  $\omega = \omega(J)$ .

Система (6) имеет трехмерное фазовое пространство. При больших значениях параметра  $b$  при переходе к переменным действие–угол (если каноническое преобразование  $(\vec{q}, \vec{p}) \rightarrow (\vec{\alpha}, \vec{J})$  возможно) динамика таких систем наглядно может быть представлена следующим образом: движение по окружности с центром  $O_1$ , образованной переменными  $\alpha_1, J_1$ , и одновременно по

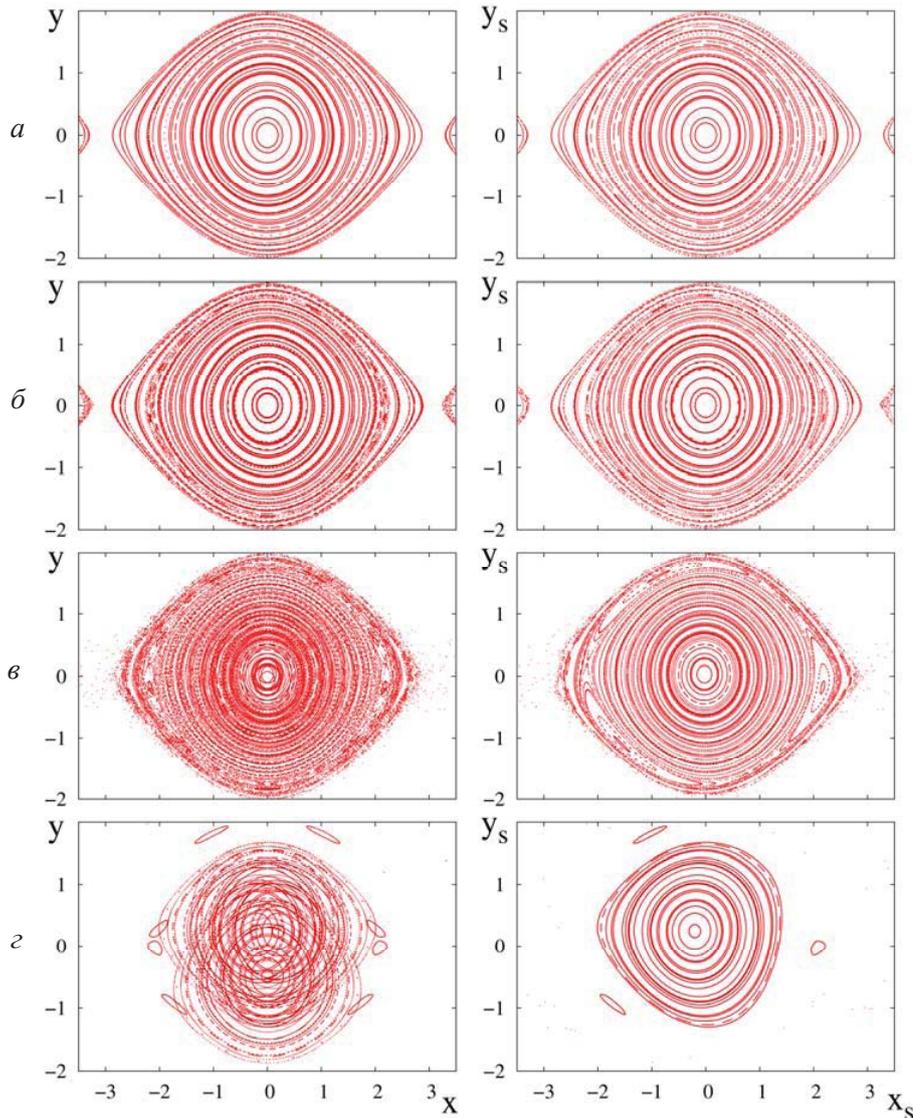


Рис. 2. Проекция фазовых траекторий на плоскость  $xu$  (левая колонка) и соответствующие множества точек в стробоскопическом сечении (правая колонка) системы (6) для параметров  $b = 0.001$  (а),  $b = 0.01$  (б),  $b = 0.1$  (в),  $b = 0.8$  (г). Параметр  $\Omega = 2\pi/3$

окружности с центром  $O_2$  (лежащей в плоскости, перпендикулярной плоскости окружности  $O_1$ ), образованной переменными  $\alpha_2, J_2$ . Суперпозиция таких вращения задает движение на торе, размерность которого равна двум (см. рис. 2, б, в).

Начиная с некоторого значения  $b$  становится невозможным различить по фазовому портрету квазипериодические и хаотические движения, поэтому далее при анализе гамильтоновой динамики мы будем использовать стробоскопическое сечение, т.е. фиксировать точки с интервалом  $2\pi$  по фазовой переменной  $\theta$ . Это поможет разграничить типы движения. Периодичным движениям будет соответствовать конечный набор точек, замкнутым траекториям – инвариантные

замкнутые кривые, случайному множеству точек – хаотический режим. Соответствующие множества точек в стробоскопическом сечении приведены на рис. 2 справа.

## 2. Возвраты Пуанкаре на инвариантных кривых гамильтоновой системы

Рассмотрим что происходит с зависимостью  $\langle \tau_{\text{inf}}(\varepsilon) \rangle$  в случае гамильтоновых систем. Как видно из рис. 2, при малых значениях параметра  $b$  фазовые портреты и множества точек в стробоскопическом сечении представляют собой набор окружностей разного радиуса и эллипсов. При больших значениях параметра  $b$  и рациональном отношении собственной частоты и



частоты внешнего воздействия (2:3 на рис. 2, *в* и 2, *г*) в фазовом пространстве проявляется типичная структура гамильтоновых систем [3]: появляются дополнительные неподвижные точки, окруженные периодическими траекториями, которые образуют острова устойчивости (на рис. 2, *в* их три). И в случае больших амплитуд *b*, и в случае малых *b* рассматривается множество инвариантных кривых. Рассмотрим различия в возвратах Пуанкаре и размерностях Афраймовича–Песина в этих множествах.

### 2.1. Случай малых амплитуд *b*

Зафиксируем параметр  $b = 0.001$ , что соответствует панели *a* на рис. 2. Фазовый портрет и стробоскопическое сечение в этом случае представляют собой множество окружностей с разным радиусом и эллипсов. Попадание на то или иное множество точек зависит от начальных условий, поэтому зафиксируем начальные условия на  $x_0 = 0.44, y_0 = 0$ . Таким начальным условия соответствует окружность постоянного радиуса  $r \approx 0.4$ , поэтому далее мы перейдем в радиальную систему координат и вместо пары координат  $x, y$  будем рассматривать только одну – угол  $\psi$ . На рис. 3, *a* приведена зависимость числа вращения от частоты внешнего воздействия  $\Omega$ . Такая зависимость близка к  $\rho = 1/\Omega$ . Исходя из этого можно подобрать такую частоту  $\Omega$ , чтобы число вращения было близко к золотому сечению.

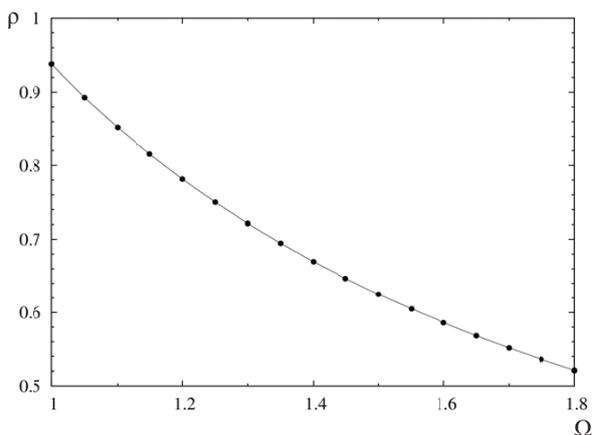


Рис. 3. Зависимость числа вращения  $\rho$  от частоты внешнего воздействия  $\Omega$  в системе (6) при  $b = 0.001$  и начальных условиях  $x_0 = 0.44, y_0 = 0$

Однако следует учитывать тот факт, что в гамильтоновых системах частоты, а следовательно, и числа вращения сильно зависят от радиуса окружности. Это позволяет задавать число вра-

щения только с некоторой погрешностью. Далее в п. 2.1 мы будем рассматривать только окружность радиуса 0.4.

На рис. 1 приведена зависимость  $\tau_{\text{inf}}(\epsilon)$  для отображения окружности. Вычисления проводились без усреднения, так как распределение плотности вероятности на окружности было равномерным. При этом результаты с усреднением по ансамблю были такими же, как и без усреднения.

В случае же вынужденного маятника, несмотря на малость параметра  $b = 0.001$ , плотность распределения вероятности системы (6) на окружности  $\approx 0.4$  является неравномерной. Вследствие этого усреднение по множеству точек нельзя заменить расчетами для одной точки. Для иллюстрации вышесказанного на рис. 4 приведены зависимости  $\tau_{\text{inf}}(\epsilon)$ , полученные при расчете возвратов в две точки:  $\psi_0 = \pi/3$  и  $\psi_0 = 2\pi/3$ . Как видно из графиков, начиная с некоторой ступеньки с  $\tau_{\text{inf}} = 13$  зависимости начинают расходиться, что говорит о необходимости усреднения по ансамблю точек.

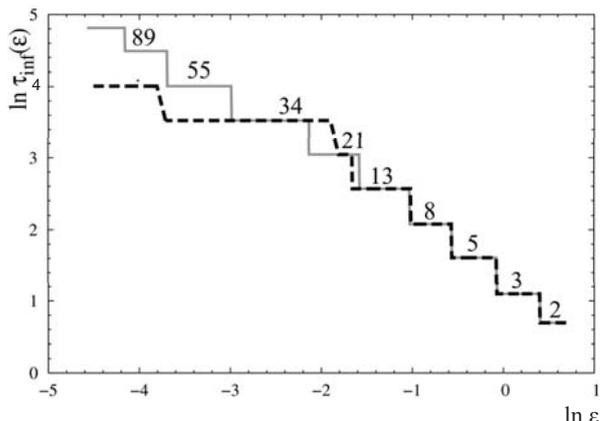


Рис. 4. Зависимость минимального времени возврата Пуанкаре от размера окрестности при локальном подходе в системе (6) при  $b = 0.001, \Omega = 1.598233989$  и начальных условиях  $x_0 = 0.44, y_0 = 0$ . Черная кривая соответствует окрестности возврата в точку  $\psi_0 = \pi/3$ , серая –  $\psi_0 = 2\pi/3$

На рис. 5 приведена зависимость  $\langle \tau_{\text{inf}}(\epsilon) \rangle$ , рассчитанная с использованием глобального подхода. Видно, что разрушение лестницы происходит начиная со ступеньки с  $\langle \tau_{\text{inf}} \rangle = 13$ . Как уже отмечалось ранее, в системе (6) такое значение числа вращения  $\rho$  может варьироваться в зависимости от рассматриваемой окружности. При параметре  $b \neq 0$  в математический маятник добавляется некоторая нелинейность, которая делает невозможным точное задание числа



вращения. Ввиду этого, по нашему мнению, «Лестница Фибоначчи» разрушается при  $\varepsilon$  меньше некоторого критического значения  $\varepsilon_{cr}$ . Для иллюстрации вышесказанного рассмотрим случай  $b = 10^{-5}$ . Предполагается, что уменьшение значения параметра  $b$  будет приводить к уменьшению нелинейности и одновременно к увеличению точности задания числа вращения.

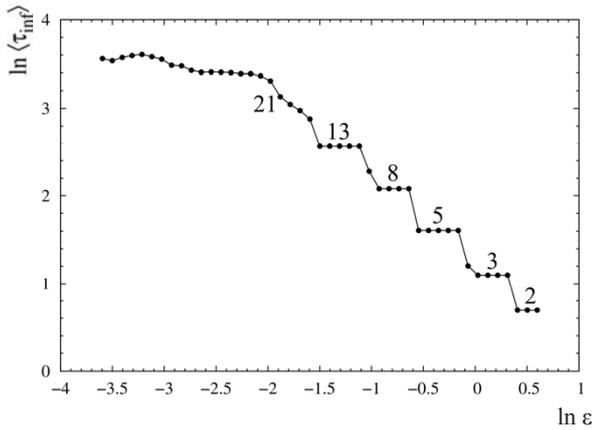


Рис. 5. Зависимость среднего минимального времени возврата Пуанкаре от размера окрестности при глобальном подходе в системе (6) при  $b = 0.001$ ,  $\Omega = 1.598233989$ . Разрушение «Лестницы Фибоначчи» начинается со ступеньки с числом  $\langle \tau_{inf} \rangle = 13$

Результаты, показанные на рис. 6, подтверждают предположения. Приведены расчеты времен возврата при глобальном подходе (см. рис. 6, б) и возвраты, рассчитанные для окрестностей точек  $\psi_0 = \pi/3$  и  $\psi_0 = 2\pi/3$ . Лестница разрушается «позже», со ступеньки  $\langle \tau_{inf}(\varepsilon) \rangle = 34$  благодаря уменьшению влияния нелинейности.

На рис. 6 приведены расчеты времен возврата при локальном и глобальном подходах при  $b = 0.00001$ . Видно, что разрушение лестницы происходит позже (со ступеньки с числом 34).

Из графиков видно, что разрушение «Лестницы Фибоначчи» происходит, когда величина  $\varepsilon$  принимает значения меньше некоторого  $\varepsilon_{cr}$ . Отсюда следует вывод, что при  $\varepsilon > \varepsilon_{cr}$  динамика точек на окружностях в гамильтоновых системах демонстрирует все те же режимы, что и отображение окружности: при малой амплитуде внешнего воздействия зависимость  $\tau_{inf}(\varepsilon)$  соответствует «Лестнице Фибоначчи». Начиная с некоторого  $\varepsilon < \varepsilon_{cr}$  лестница разрушается. Увеличение амплитуды внешнего воздействия  $b$  приводит к сдвигу порога разрушения лестницы  $\varepsilon_{cr}$  в сторону больших  $\varepsilon$ .

### 2.2. Случай больших амплитуд

На рис. 7, а приведено множество точек, полученное в стробоскопическом сечении системы (6) при  $b = 0.1$ , начальных условиях  $x_0 = -2.1$ ,  $y_0 = -0.6$  и частоте внешнего воздействия  $\Omega = 2\pi/3$ . В отличие от п. 2.1 выбор такого параметра  $\Omega$  соответствует рациональному отношению внешней и собственной частот: 2:3. Это приводит к рождению трех неподвижных периодических точек. В окрестности этих точек существует множество инвариантных кривых (см. рис. 2, в). Одно из таких множеств приведено на рис. 7, а. Интерес представляет рассмотреть статистику возвратов Пуанкаре в этом множестве. На рис. 7, б приведена соответствующая зависимость  $\langle \tau_{inf}(\varepsilon) \rangle$ . Зависимость  $\langle \tau_{inf}(\varepsilon) \rangle$  от размера окрестности

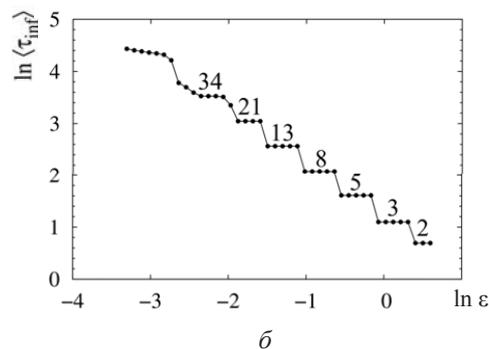
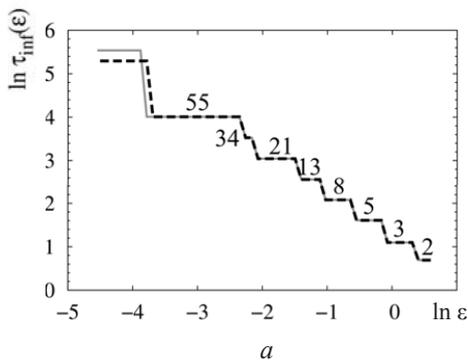


Рис. 6. Зависимость минимального времени возврата Пуанкаре от размера окрестности при локальном подходе в системе (6) при  $b = 0.00001$ ,  $\Omega = 1.598033989$  и начальных условиях  $x_0 = 0.44$ ,  $y_0 = 0$ . Черная кривая соответствует окрестности возврата в точку  $\psi_0 = \pi/3$ , серая –  $\psi_0 = 2\pi/3$  (а); зависимость среднего минимального времени возврата Пуанкаре от размера окрестности при глобальном подходе в системе (6) при  $b = 0.00001$ ,  $\Omega = 1.598033989$ . Разрушение «Лестницы Фибоначчи» начинается со ступеньки с числом  $\langle \tau_{inf} \rangle = 34$  (б)



свидетельствует о том, что ее можно аппроксимировать линией:  $\ln\langle\tau_{\text{inf}}(\varepsilon)\rangle = -\ln\varepsilon + C$ . Однако начиная с некоторого  $\varepsilon < \varepsilon_{cr}$  значения  $\langle\tau_{\text{inf}}(\varepsilon)\rangle$  почти не меняются, что, по нашему мнению, объясняется высокой степенью нелинейности при  $b=0.1$ . Таким образом, при  $\varepsilon > \varepsilon_{cr}$  зависимость  $\langle\tau_{\text{inf}}(\varepsilon)\rangle$

представляет собой прямую линию с наклоном  $-1$ . Отсюда следует, что размерность Афраймовича–Песина равна единице. Если же  $\varepsilon < \varepsilon_{cr}$ , то значения  $\langle\tau_{\text{inf}}(\varepsilon)\rangle$  практически не изменяются, и из-за нелинейности расчет размерности Афраймовича–Песина не представляется возможным.

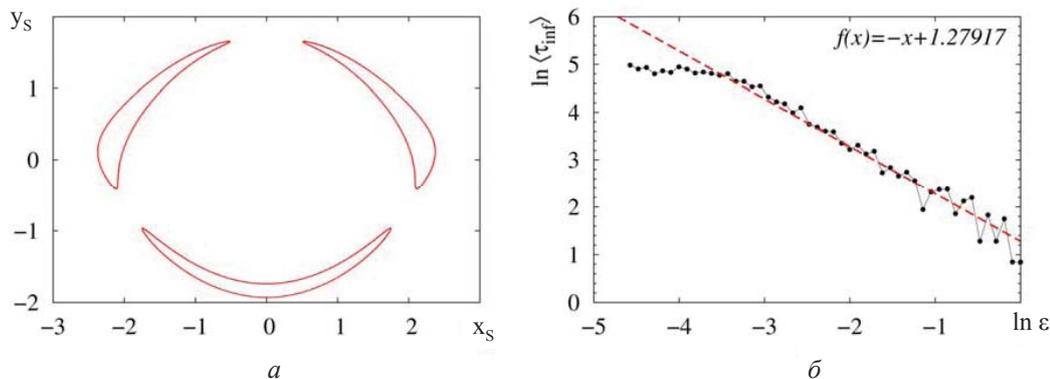


Рис. 7. Множество, полученное в стробоскопическом сечении системы (6) при  $b=0.1$ , начальных условиях  $x_0 = -2.1, y_0 = -0.6$  и частоте внешнего воздействия  $\Omega = 2\pi/3$  (а); зависимость  $\ln\langle\tau_{\text{inf}}(\ln\varepsilon)\rangle$  (б)

### Выводы

В работе представлены результаты статистического анализа множеств, полученных в стробоскопическом сечении гамильтоновой системы – математического маятника под внешним гармоническим воздействием. Рассмотрены два основных случая: случай малых и больших амплитуд внешнего воздействия  $b$ . Рассмотрены два основных типа инвариантных кривых в стробоскопическом сечении гамильтоновой системы: окружности, которые получаются при иррациональном отношении собственной и внешней частот; инвариантные кривые, которые образуются вокруг трех неподвижных периодических точек при рациональном отношении частот 2:3. В случае иррационального отношения исследование статистики времен возврата в рассматриваемое множество показало, что в зависимости  $\langle\tau_{\text{inf}}(\varepsilon)\rangle$  в гамильтоновых системах можно выделить два участка, разделенных значением  $\varepsilon = \varepsilon_{cr}$ , где  $\varepsilon_{cr}$  есть некоторое критическое значение. При  $\varepsilon > \varepsilon_{cr}$  зависимость  $\langle\tau_{\text{inf}}(\varepsilon)\rangle$  схожа с аналогичной зависимостью, полученной в отображении окружности при таком же числе вращения, «Лестницей Фибоначчи». Для малых  $\varepsilon < \varepsilon_{cr}$  лестница разрушается. Стоит также отметить, что уменьшение амплитуды внешнего воздействия приводит к сдвигу критического значения  $\varepsilon_{cr}$  в сторону меньших  $\varepsilon$ . Исследование статистики

времен возврата в резонансных торах показало, что зависимость  $\langle\tau_{\text{inf}}(\varepsilon)\rangle$  также можно разбить на два участка, разделенных критическим значением  $\varepsilon_{cr}$ . Причем для  $\varepsilon > \varepsilon_{cr}$  зависимость  $\ln\langle\tau_{\text{inf}}(\varepsilon)\rangle$  можно аппроксимировать прямой линией с коэффициентом угла наклона  $-1$ , что говорит о том, что на этом участке размерность Афраймовича–Песина есть  $\alpha_c = 1$ . В случае же  $\varepsilon < \varepsilon_{cr}$  значения  $\langle\tau_{\text{inf}}\rangle$  практически не изменяются.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-02-02288).*

### Список литературы

1. Пуанкаре А. Избранные труды : в 3 т. Т. 2 : Небесная механика. Топология. Теория чисел. М. : Наука, 1972. 1000 с.
2. Hirata M., Saussol B., Vaienti S. Statistics of Return Times : A General Framework and New Applications // Commun. Math. Phys. 1999. Vol. 206, iss. 1. P. 33—55.
3. Afraimovich V., Ugalde E., Urias J. Fractal dimension for Poincaré recurrences. Elsevier, 2006. 245 p.
4. Анищенко В. С., Астахов С. В. Теория возвратов Пуанкаре и её приложение к задачам нелинейной физики // УФН. 2013. Т. 183. С. 1009–1028.
5. Afraimovich V. Pesin’s dimension for Poincaré recurrences // Chaos. 1997. Vol. 7, iss. 1. P. 12–20.
6. Afraimovich V., Zaslavsky G. M. Fractal and multifractal properties of exit times and Poincaré recurrences // Phys. Rev. E. 1997. Vol. 55. P. 5418–5426.



7. Penné V., Saussol B., Vaienti S. Fractal and statistical characteristics of recurrence times // *Journal de Physique*. 1998. Vol. 8, iss. 6. P. 163–171.
8. Anishchenko V. S., Astakhov S. V., Boev Ya. I., Biryukova N. I., Strelkova G. I. Statistics of Poincaré recurrences in local and global approaches // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2013. Vol. 18, iss. 12. P. 3423–3435.
9. Anishchenko V. S., Boev Ya. I., Semenova N. I., Strelkova G. I. Local and global approaches to the problem of Poincaré recurrences. Applications in nonlinear dynamics // *Phys. Rep.* 2015. Vol. 587. P. 1–39.
10. Semenova N. I., Vadivasova T. E., Strelkova G. I., Anishchenko V. S. Statistical properties of Poincaré recurrences and Afraimovich–Pesin dimension for the circle map // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2015. Vol. 22. P. 1050–1061.
11. Slater N. B. Gaps and steps for the sequence  $n\theta \bmod 1$  // *Proc. Camb. Philos. Soc.* 1967. Vol. 63, iss. 4. P. 1115–1123.
12. Chirikov B. V., Shepelyansky D. L. Asymptotic Statistics of Poincaré Recurrences in Hamiltonian Systems with Divided Phase Space // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 82. P. 528–531.
13. Shepelyansky D. L. Poincaré recurrences in Hamiltonian systems with a few degrees of freedom // *Phys. Rev. E.* 2010. Vol. 82. P. 055202.
14. Lichtenberg A. J., Leiberman M. A. Regular and Stochastic Motion. Applied mathematical sciences. Springer-Verlag, 1982. 499 p.
15. Заславский Г. М., Кириченко Н. А. Хаос динамический // *Физическая энциклопедия* : в 5 т. / глав. ред. А. М. Прохоров. М. : Сов.энцикл., 1988. Т. 5. С. 397–402.
16. Srivastava N., Kaufman C., Müller G. Hamiltonian chaos // *Computers in Physics*. 1990. Vol. 4. P. 549–553.

#### Образец для цитирования:

Семенова Н. И., Галактионова Т. И., Анищенко В. С. Возвраты Пуанкаре и размерность Афраимовича–Песина в неавтономном консервативном осцилляторе // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 195–203. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-195-203.

#### Poincaré Recurrences and Afraimovich–Pesin Dimension in a Nonautonomous Conservative Oscillator

N. I. Semenova<sup>1</sup>, T. I. Galaktionova<sup>2</sup>, V. S. Anishchenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Nadezhda I. Semenova, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, semenovani@info.sgu.ru

<sup>2</sup>Tatyana I. Galaktionova, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, galaktozat@ya.ru

<sup>3</sup>Vadim S. Anishchenko, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, wadim@info.sgu.ru

**Background and Objectives:** One of the fundamental features of the temporal dynamics is Poincaré recurrence. It has been shown that statistics of return time in global approach depends on topological entropy  $h$ . The case of  $h > 0$  (set with mixing) has been already studied theoretically. The theoretical conclusions have been confirmed by numerical simulation. The case of the sets without mixing ( $h = 0$ ) has been studied theoretically, but recent numerical results shows some special aspects which are absent in theory. In particular, it has been obtained that the dependence of the mean minimal return time on the size of  $\varepsilon$ -vicinity in a circle map is a step function («Fibonacci stairs»). **Materials and Methods:** In the present paper the Poincaré recurrences are studied numerically for invariant curves in the stroboscopic section of trajectories of a nonautonomous conservative oscillator. **Results:** It is shown that the dependence of the mean minimal return time on the size of  $\varepsilon$ -vicinity is a step function («Fibonacci stairs»). In addition, the Afraimovich–Pesin dimension has been calculated in cases of rational and irrational natural and external frequency ratios. **Conclusion:** We have found the conditions of occurrence of «Fibonacci stairs» and the impact of the amplitude of the external harmonic force. It is shown that this dependence

exists only in some interval of  $\varepsilon$ . The size of the interval depends on amplitude of external force.

**Key words:** Poincaré recurrences, Hamiltonian systems, Afraimovich–Pesin dimension, rotation number, Fibonacci stairs, nonautonomous conservative oscillator, set without mixing, topological entropy, golden ratio, return time.

#### References

1. Poincaré H. *Izbrannyye trudy: v 3 t. T. 2: Nebesnaya mekhanika. Topologiya. Teoriya chisel* [Selected works: in 3 vols. Vol. 2: Celestial mechanics. Topology. Number theory]. Moscow : Nauka, 1972. 1000 p. (in Russian).
2. Hirata M., Saussol B., Vaienti S. Statistics of Return Times: A General Framework and New Applications. *Commun. Math. Phys.*, 1999, vol. 206, iss. 1, pp. 33–55.
3. Afraimovich V., Ugalde E., Urias J. *Fractal dimension for Poincaré recurrences*. Elsevier, 2006. 245 p.
4. Anishchenko V. S., Astakhov S. V. Poincaré recurrence theory and its applications to nonlinear physics. *Phys. Usp.*, 2013, vol. 56, pp. 955–972.
5. Afraimovich V. Pesin’s dimension for Poincaré recurrences. *Chaos*, 1997, vol. 7, iss. 1, pp. 12–20.
6. Afraimovich V., Zaslavsky G. M. Fractal and multifractal properties of exit times and Poincaré recurrences. *Phys. Rev. E.*, 1997, vol. 55, pp. 5418–5426.
7. Penné V., Saussol B., Vaienti S. Fractal and statistical characteristics of recurrence times. *Journal de Physique*, 1998, vol. 8, iss. 6, pp. 163–171.
8. Anishchenko V. S., Astakhov S. V., Boev Ya. I.,



- Biryukova N. I., Strelkova G. I. Statistics of Poincaré recurrences in local and global approaches. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2013, vol. 18, iss. 12, pp. 3423–3435.
9. Anishchenko V. S., Boev Ya. I., Semenova N. I., Strelkova G. I. Local and global approaches to the problem of Poincaré recurrences. Applications in nonlinear dynamics. *Phys. Rep.*, 2015, vol. 587, pp. 1–39.
  10. Semenova N. I., Vadivasova T. E., Strelkova G. I., Anishchenko V. S. Statistical properties of Poincaré recurrences and Afraimovich–Pesin dimension for the circle map. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2015, vol. 22, pp. 1050–1061.
  11. Slater N. B. Gaps and steps for the sequence  $n\theta \pmod 1$ . *Proc. Camb. Philos. Soc.*, 1967, vol. 63, iss. 4, pp. 1115–1123.
  12. Chirikov B. V., Shepelyansky D. L. Asymptotic Statistics of Poincaré Recurrences in Hamiltonian Systems with Divided Phase Space. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, vol. 82, pp. 528–531.
  13. Shepelyansky D. L. Poincaré recurrences in Hamiltonian systems with a few degrees of freedom. *Phys. Rev. E.*, 2010, vol. 82, pp. 055202.
  14. Lichtenberg A. J., Leiberman M. A. *Regular and Stochastic Motion. Applied mathematical sciences.* Springer-Verlag, 1982. 499 p.
  15. Zaslavsky G. M., Kirichenko N. A. Хаос динамический [Dynamic Chaos]. *Fizicheskaya entsiklopediya* [Physical encyclopedia: in 5 vols]. Ans. ed. A. M. Prokhorov. Moscow, Great Soviet Encyclopedia Publ., 1988, vol. 5, pp. 397–402 (in Russian).
  16. Srivastava N., Kaufman C., Müller G. Hamiltonian chaos. *Computers in Physics.*, 1990, vol. 4, pp. 549–553.

**Please cite this article in press as:**

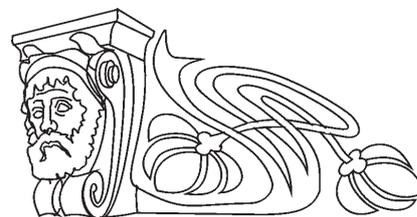
Semenova N. I., Galaktionova T. I., Anishchenko V. S. Poincaré Recurrences and Afraimovich–Pesin Dimension in a Nonautonomous Conservative Oscillator. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 195–203. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-195-203.

## ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 53.06

### РАСЧЕТ И АППРОКСИМАЦИЯ РАДИАЛЬНОЙ ДОЗОВОЙ ФУНКЦИИ ИРИДИЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ

А. В. Белоусов<sup>1</sup>, А. А. Беянов<sup>2</sup>, А. П. Черняев<sup>3</sup>



<sup>1</sup>Белоусов Александр Витальевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, BelousovAV@physics.msu.ru

<sup>2</sup>Беянов Александр Александрович, младший научный сотрудник кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, belyanov@cern.ch

<sup>3</sup>Черняев Александр Петрович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины; заведующий лабораторией пучковых технологий и медицинской физики, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, a.p.chernyev@yandex.ru

Задачей исследования является вычисление дозиметрических характеристик капсулированных источников для брахитера-

пии. Расчеты выполнены с помощью написанного авторами программного кода на основе пакета библиотек GEANT4, предназначенного для моделирования методом Монте–Карло процессов транспорта частиц. Определены следующие характеристики источника: константа мощности дозы, радиальная дозовая функция и функция анизотропии. Получено удовлетворительное согласие с данными сторонних авторов. Данные, получаемые с помощью разработанного и верифицированного программного кода, могут быть использованы для внесения в системы дозиметрического планирования. Также в настоящей работе представлена улучшенная функциональная форма для аппроксимирования радиальной дозовой функции закрытых источников для брахитерапии на основе нуклида <sup>192</sup>Ir. Предложенные функции позволяют точно аппроксимировать радиальную дозовую функцию в диапазоне 0.5–20 см. Максимальные отклонения между данными аппроксимирования и данными моделирования по методу Монте–Карло не превышают 0.6%, тогда как средние отклонения составляют порядка 0.1%. Коэффициенты аппроксимирования для предложенных функций приводятся для 11 источников различных производителей.



Предложенные функции подходят для использования в системах дозиметрического планирования с целью более точного вычисления дозовых распределений вокруг источников с применением широкого диапазона данных согласно протоколу TG-43. **Ключевые слова:** источники для брахитерапии, метод Монте–Карло, GEANT4, TG-43.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-203-211

## Введение

Моделирование методом Монте–Карло широко распространено и прочно вошло в практику расчетов дозиметрических характеристик брахитерапевтических источников. Согласно рекомендациям Американской ассоциации медицинских физиков (American Association of Physicists in Medicine (AAPM)) и Европейского общества терапевтической радиологии и онкологии (European Society for Therapeutic Radiology and Oncology (ESTRO)) [1] для источников, используемых в клинической практике, должен быть определен ряд данных, основанный на формализме Рабочей группы № 43 Комитета радиационной терапии (формализм TG-43) [2] AAPM по исследованию высокоэнергетичных источников для брахитерапии ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  и др.). Рабочая группа (TG № 43) предлагает определять набор дозиметрических данных по крайней мере на одном экспериментальном исследовании и одном исследовании методом Монте–Карло. Однако для капсулированных источников, дизайн которых подобен уже существующим, достаточно единственного дозиметрического исследования, выполненного любым способом и опубликованного в работах с независимым рецензированием. Дозиметрические параметры должны быть определены исследователями независимо от производителя источника и опубликованы в рецензируемых журналах до начала применения в клинической практике [3]. В системах дозиметрического планирования могут быть использованы как наборы экспериментальных данных, так и наборы данных моделирования.

Для экспериментального определения дозиметрических характеристик широко используются ионизационные камеры, термолюминисцентные дозиметры и радиохромные пленки, также обычной практикой является компьютерное моделирование методом Монте–Карло. При таком подходе снимаются проблемы, связанные с дозиметрией в областях с высокими градиентами доз, точностью позиционирования дозиметров и точностью определения их активного объема. Известно большое количество различных программных кодов, включая EGSnrc [4, 5], GEANT4

[6–10], PENELOPE [11], PTRAN [12] и MCNP4C [13], которые широко используются для табулирования данных согласно формализму TG-43.

При расчете распределения поглощенной дозы возле брахитерапевтического источника многие коммерческие системы планирования обращаются к функциональным зависимостям, полученным в результате аппроксимирования набора значений так называемой радиальной дозовой функции. Этот набор данных может быть определен как в результате экспериментальных дозиметрических исследований, так и получен с помощью компьютерного моделирования. Протокол рабочей группы AAPM TG-43 рекомендует использовать для аппроксимирования полиномы третьего – пятого порядков в форме

$$g(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 + a_5 r^5. \quad (1)$$

Коэффициенты аппроксимирования доступны в научной литературе для большого количества используемых в настоящее время источников. Хотя точность полиномов пятого порядка и достаточна для аппроксимирования и интерполирования радиальной дозовой функции в области  $0.5 \leq r \leq 20$  см, качество аппроксимирования резко падает при выходе за пределы этого диапазона. Кроме того, с физической точки зрения радиальная дозовая функция на бесконечности должна обращаться в ноль, а не принимать бесконечных значений.

Целью настоящей работы является разработка собственного программного кода на основе пакета моделирования по методу Монте–Карло – GEANT4, предназначенного для расчета дозиметрических характеристик закрытых (капсулированных) источников. Верификация данной версии программного кода по литературным данным для хорошо изученной и часто используемой модели BEBIG Ir2.A85-2. Выбор источника обусловлен тем обстоятельством, что имеются литературные данные с результатами расчетов, выполненных с помощью предыдущей версии библиотеки программ GEANT 4.7.1. Аппроксимация радиальной дозовой функции для источника BEBIG Ir2.A95-2 и еще 10 источников, содержащих в качестве радионуклида  $^{192}\text{Ir}$ , оценка качества аппроксимирования и выбор оптимальной функции аппроксимирования.

## 1. Материалы и методы

В качестве программного кода для моделирования методом Монте–Карло выбран пакет библиотек GEANT4.9.6, который свободно



распространяется и широко используется для различных медицинских приложений. Расчеты основаны на применении модели низкоэнергетических электромагнитных взаимодействий, разработанной в Национальной лаборатории Лоуренса Ливермора (LLNL). Данная модель симулирует электромагнитные взаимодействия фотонов и заряженных частиц и основана на оцененных библиотеках сечений EPDL97, EEDL и EADL. В настоящем программном коде траассируются все испущенные частицы и симулируются следующие виды взаимодействия фотонов: фотоэлектрическое поглощение, комптоновское и рэлеевское рассеяние, процесс рождения пар. Для электронов учитываются процессы многократного рассеяния, ионизации и генерации тормозного излучения. Спектры фотонов соответствуют базе данных NuDat [14].

Согласно формализму TG-43 базовое выражение, описывающее распределение мощности поглощенной дозы вокруг расположенного в водной среде источника, представляется в следующем виде:

$$\dot{D}(r, \theta) = S_K \Lambda \frac{G_L(r, \theta)}{G_L(r_0, \theta_0)} g(r) F(r, \theta), \quad (2)$$

где  $S_K$  – сила воздушной кермы,  $\Lambda$  – константа мощности дозы,  $G_L(r, \theta)$  – геометрическая функция (геометрический фактор),  $g(r) = \frac{\dot{D}(r, \theta_0) G_L(r_0, \theta_0)}{\dot{D}(r_0, \theta_0) G_L(r, \theta_0)}$  – радиальная дозовая

функция линейного источника, а  $F(r, \theta)$  – функция анизотропии. Координата  $r$  есть расстояние от центра источника до точки наблюдения  $P(r, \theta)$ , а угол отсчитывается от оси симметрии источника к отрезку, проведенному из центра источника в точку наблюдения. Референсная точка  $P_0(r_0, \theta_0)$  имеет координаты  $r_0 = 1$  см,  $\theta_0 = \pi/2$ . В выражении (2) временная зависимость описывается членом  $S_K$ , который определяется только активностью источника, поэтому для расчетов остальных членов могут быть использованы значения не мощности поглощенной дозы в соответствующих точках, а самой поглощенной дозы.

Для определения силы воздушной кермы  $S_K$  использовались результаты определения воздушной кермы в свободном пространстве, которое соответствует следующей геометрии. Источник размещается в центре заполненного воздухом куба размерами  $4 \text{ м} \times 4 \text{ м} \times 4 \text{ м}$ , размеры которого соответствуют условиям полного рассеяния. В плоскости, проходящей через

середину источника перпендикулярно его оси симметрии, определялось значение воздушной кермы  $K(d)$  на расстояниях  $d$  от 2 до 100 см от источника с шагом 1 см. Керма определялась в сетке детекторов, которые представляют собой полые цилиндры толщиной 1 мм и высотой 2 мм. Для учета поглощения и рассеяния излучения в воздухе полученные значения аппроксимируются выражением  $K(d)d^2 = S_K + \alpha d$ , где  $\alpha$  – параметр аппроксимации. Константа мощности дозы

$\Lambda$  определяется из соотношения  $\Lambda = \frac{D(r_0, \theta_0)}{S_K}$ , где  $D(r_0, \theta_0)$  – поглощенная в воде доза, определенная в референсной точке. Для ее определения источник помещается в водный куб такого же размера, геометрия детекторов также остается без изменения. Определяется выделившаяся в объеме энергия, которая затем нормируется на массу детектора. Геометрическая функция линейного источника  $G_L(r, \theta)$  рассчитывается согласно выражению

$$G_L(r, \theta) = \begin{cases} \frac{\beta}{Lr \sin \theta}, & \theta \neq 0, \\ \frac{1}{r^2 - (L/2)^2}, & \theta = 0, \end{cases}$$

где  $L$  – длина активной части источника,  $\beta$  – угол, под которым видны концы источника из точки наблюдения.

Сетка детекторов, использовавшихся для определения радиальной дозовой функции и функции анизотропии, представляет собой набор сферических слоев толщиной 0.5 мм. Для определения функции анизотропии каждый сферический слой дополнительно разбивается по углу  $\theta$  на сектора от  $0^\circ$  до  $0.5^\circ$ , от  $0.5^\circ$  до  $179.5^\circ$  с шагом  $1^\circ$  и дополнительный сектор от  $179.5^\circ$  до  $180^\circ$ . Для определения силы воздушной кермы симулировалось  $10^9$  историй фотонов, а для радиальной дозовой функции и функции анизотропии –  $10^{10}$  историй. Геометрия целиком соответствует модели BEBIG Ir2.A85-2 [15].

Промышленно выпускаются два типа брахитерапевтических источников, содержащих в качестве активного вещества  $^{192}\text{Ir}$ , первый тип характеризуется плавно возрастающим значением радиальной дозовой функции до максимума на расстоянии 1 см от источника, второй тип – убыванием дозы с расстоянием при малых значениях  $r$ . К первому типу относятся источники BEBIG GI192M11, Flexisource, Gammamed 12i, Gammamed plus, Microselectron V1 и V2, SPEC



M19, VariSource classic и VarySource VS200, ко второму типу – BEBIG Ir2.A95-2 и Buchler G0814.

Разные авторы предлагали множество альтернатив полиномам, включая двойную экспоненту [16]

$$g(r) = a_0 e^{-a_1 r} + a_2 e^{-a_3 r}; \quad (3)$$

Moss [17] предложил использовать модифицированную сигмоидальную функцию

$$g(r) = a_0 \left( \frac{a_1 + e^{-a_2(r-a_4)}}{a_1 + e^{-a_2(r-a_4)} + e^{-a_3(r-a_4)}} \right), \quad (4)$$

а Meigooni с соавт. [18] предложил модифицировать полином экспоненциальным множителем

$$g(r) = (a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 + a_5 r^5) e^{-a_6 r}. \quad (5)$$

Все перечисленные выше функции, хотя и позволяют более точно аппроксимировать данные, тем не менее, не всегда точно описывают поведение радиальной дозовой функции при малых расстояниях от источника, что особенно критично в случае источников с радионуклидами  $^{125}\text{I}$  и  $^{103}\text{Pd}$ .

Выражение (2) имеет некоторый физический смысл, если предположить, что спектр фотонов, испускаемых радионуклидом, состоит из двух главных линий, что справедливо для нуклида  $^{60}\text{Co}$ . Для более точного учета быстрого изменения радиальной дозовой функции на малых расстояниях от источника можно использовать модификацию выражения (4) в виде

$$g(r) = (a_0 r^{-1} + a_1 + a_2 r + a_3 r^2 + a_4 r^3) e^{-a_6 r} \equiv P_{-1,3} \times \exp, \quad (6)$$

$$g(r) = (a_0 r^{-2} + a_1 r^{-1} + a_2 + a_3 r + a_4 r^2 + a_5 r^3) e^{-a_6 r} \equiv P_{-2} \times \exp, \quad (7)$$

или

$$g(r) = (a_0 r^{-1} + a_1 + a_2 r + a_3 r^2 + a_4 r^3 + a_5 r^4) e^{-a_6 r} \equiv P_{-1,4} \times \exp \quad (8)$$

Все выражения подобраны таким образом, чтобы количество параметров аппроксимирования не превышало 7.

Во всех случаях аппроксимация выполнена нелинейным методом наименьших квадратов с помощью пакета OriginPro. Качество аппроксимирования оценивалось по двум критериям: во-первых, по погрешности коэффициентов аппроксимирования, а во-вторых, по средним и максимальным отклонениям результатов аппроксимирования от табулированных данных согласно выражениям

$$R_i = \left| \frac{g_{fit}(r_i) - g_{data}(r_i)}{g_{data}(r_i)} \right|, \quad (9)$$

$$\langle R \rangle = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N R_i^2}, \quad (10)$$

где  $g_{fit}(r_i)$  – результат вычисления функции аппроксимирования в точке  $r_i$ , а  $g_{data}(r_i)$  – значение табулированных данных в той же точке. Для каждой функции аппроксимация выполнена в диапазоне  $0.5 \leq r \leq 20$  см.

## 2. Результаты и их обсуждение

Значение константы мощности дозы для источника Ir2.A85-2 –  $1.114 \pm 0.019$  cGy/(hU). Результаты вычислений с помощью программного пакета GEANT4.0, выполненные Granero [15], составляют  $1.109 \pm 0.013$  cGy/(hU). Результаты совпадают в пределах погрешности, расхождения могут быть обусловлены отличием в спектрах радиоизотопов и версиях программного кода. Значения радиальной дозовой функции источника BEBIG Ir2.A95-2 получены авторами и взяты из работы [15], результаты сравнения приводятся в табл. П. 1. Для всех остальных источников данные взяты из базы данных Карлтонского университета [20]. В табл. 2 и 3 приводятся данные о качестве аппроксимирования (среднее и максимальное отклонения) радиальных дозовых функций иридиевых источников по выражениям (1) и (3–8), качество аппроксимирования оценивается согласно выражениям (9) и (10). Параметры аппроксимирования для оптимальных выражений приводятся в табл. П. 4.

Как видно из табл. П. 2, наилучшие результаты для радиальных дозовых функций источников первого типа дает аппроксимация по формулам (6) – (8). Для источников второго типа более качественна аппроксимация по формулам (7) и (8). В целом для исследуемых источников аппроксимация по формуле (8) дает наиболее удовлетворительные результаты. Параметры аппроксимирования по формулам (6) и (8) представлены в табл. П. 4. Максимальные отклонения между данными аппроксимирования и данными моделирования по методу Монте-Карло не превышают 0.6%, тогда как средние отклонения составляют порядка 0.1%. Предложенные функции подходят для использования в системах дозиметрического планирования с целью более точного вычисления дозовых распределений вокруг источников с применением широкого диапазона данных согласно протоколу TG-43.

## Заключение

- Разработан и верифицирован программный код для расчёта распределение кермы и поглощенной дозы вокруг брахитерапевтического



источника произвольной формы с произвольным активным радионуклидом.

- В соответствии с формализмом TG-43 определены следующие параметры: константа мощности дозы, радиальная дозовая функция и функция анизотропии.

- Получено удовлетворительное согласие результатов моделирования с литературными данными. Данные, получаемые с помощью разработанного и верифицированного программного кода, могут быть использованы для внесения в системы дозиметрического планирования.

- Предложены функции аппроксимирования радиальной дозовой функции закрытых источников для брахитерапии с высокой мощностью

дозы на основе нуклида  $^{192}\text{Ir}$ , которые использованы для аппроксимирования данных 11 источников, и отличаются более высоким качеством аппроксимирования в сравнении с полиномом пятого порядка, рекомендованным рабочей группой TG-43 AAPM. Данные функции могут быть использованы в диапазоне расстояний 0.5–20 см от источника. Максимальные отклонения между данными аппроксимирования и данными моделирования по методу Монте–Карло не превышают 0.6%, тогда как средние отклонения составляют порядка 0.1%. Полагаем, что предложенные функции являются отличными кандидатами для использования при расчете дозных распределений в системах дозиметрического планирования.

### Приложение

Таблица II. 1

Радиальные дозовые функции источников BEBIG Co0.A86 и BEBIG Ir2.A85-2

Расстояние $r$ , см	$g(r)$			
	BEBIG Co0.A86		BEBIG Ir2.A85-2	
	[8]	Наст. работа	[15]	Наст. работа
0.25	1.007	1.045	0.990	0.993
0.5	1.036	1.026	0.996	0.996
0.75	1.015	1.010	0.998	0.998
1	1.000	1.000	1.000	1.000
1.5	0.992	0.986	1.002	1.004
2	0.984	0.979	1.004	1.004
3	0.968	0.962	1.005	1.010
4	0.952	0.946	1.003	1.008
5	0.936	0.930	0.999	1.006
6	0.919	0.917	0.991	1.000
7	0.902	0.898	0.981	0.987
8	0.884	0.882	0.968	0.973
10	0.849	0.847	0.935	0.943
12	0.813	0.810	0.894	0.903
15	0.756	0.756	0.821	0.827
20	0.665	0.658	0.686	0.686

Таблица II.2

Результаты аппроксимирования источников первого типа

Источник		BEBIG GI192M11	FlexiSource	Gammamed 12i	Gammamed plus	Microselectron V1	Microselectron V2	SPEC M19	VariSource Classic	VariSource V2000
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_3$	$R_{\max}$ , %	0.29	0.35	0.41	0.33	0.42	0.26	0.33	0.41	0.22
	$\langle R \rangle$ , %	0.08	0.10	0.11	0.08	0.11	0.08	0.11	0.11	0.08
$P_4$	$R_{\max}$ , %	0.28	0.26	0.41	0.32	0.41	0.21	0.34	0.39	0.23
	$\langle R \rangle$ , %	0.07	0.07	0.11	0.07	0.10	0.07	0.10	0.10	0.07



Окончание табл. П.2

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_5$	$R_{\max}$ , %	0.28	0.24	0.41	0.32	0.41	0.15	0.30	0.41	0.29
	$\langle R \rangle$ , %	0.09	0.07	0.12	0.09	0.11	0.06	0.10	0.12	0.09
$P_6$	$R_{\max}$ , %	0.28	0.36	0.40	0.31	0.41	0.19	0.27	0.27	0.23
	$\langle R \rangle$ , %	0.08	0.09	0.10	0.07	0.09	0.07	0.08	0.09	0.07
Гаусс	$R_{\max}$ , %	0.27	0.24	0.40	0.31	0.41	0.39	0.36	0.54	0.25
	$\langle R \rangle$ , %	0.08	0.07	0.10	0.07	0.09	0.10	0.09	0.14	0.08
$P_3 \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.28	0.24	0.41	0.32	0.41	0.26	0.31	0.36	0.23
	$\langle R \rangle$ , %	0.07	0.07	0.10	0.07	0.09	0.07	0.10	0.10	0.10
$P_4 \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.28	0.24	0.41	0.32	0.41	0.17	0.31	0.36	0.23
	$\langle R \rangle$ , %	0.08	0.07	0.10	0.07	0.09	0.07	0.10	0.10	0.08
$P_5 \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.26	0.22	0.39	0.30	0.40	0.15	0.26	0.19	0.23
	$\langle R \rangle$ , %	0.08	0.07	0.09	0.06	0.09	0.06	0.08	0.08	0.07
$P_{-2} \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.22	0.21	0.33	0.27	0.37	0.22	0.25	0.18	0.21
	$\langle R \rangle$ , %	0.07	0.07	0.10	0.06	0.09	0.06	0.09	0.07	0.08
$P_{-1,3} \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.22	0.25	0.33	0.26	0.38	0.21	0.27	0.18	0.21
	$\langle R \rangle$ , %	0.07	0.07	0.10	0.07	0.09	0.07	0.10	0.08	0.08
$P_{-1,4} \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.22	0.20	0.33	0.26	0.38	0.16	0.27	0.19	0.21
	$\langle R \rangle$ , %	0.07	0.07	0.10	0.06	0.09	0.07	0.10	0.07	0.08

Таблица П.3

Результаты аппроксимирования источников второго типа

Источник		Buchler G0814	BEBIG Ir2,A95-2 [8]	BEBIG Ir2,A95-2 [15]
$P_3$	$R_{\max}$ , %	0.65	1.21	1.64
	$\langle R \rangle$ , %	0.17	0.18	0.20
$P_4$	$R_{\max}$ , %	0.56	0.88	1.28
	$\langle R \rangle$ , %	0.14	0.14	0.18
$P_5$	$R_{\max}$ , %	0.55	0.55	0.96
	$\langle R \rangle$ , %	0.13	0.10	0.15
$P_6$	$R_{\max}$ , %	0.54	3.62	3.99
	$\langle R \rangle$ , %	0.14	0.25	0.30
Гаусс	$R_{\max}$ , %	0.58	1.51	1.85
	$\langle R \rangle$ , %	0.13	0.20	0.19
$P_3 \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.55	0.94	0.14
	$\langle R \rangle$ , %	0.13	1.41	0.19
$P_4 \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.52	0.30	0.76
	$\langle R \rangle$ , %	0.12	0.07	0.12
$P_5 \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.52	0.30	0.76
	$\langle R \rangle$ , %	0.13	0.07	0.12
$P_{-2} \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.40	0.20	0.28
	$\langle R \rangle$ , %	0.11	0.03	0.03
$P_{-1,3} \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.40	0.22	0.32
	$\langle R \rangle$ , %	0.11	0.03	0.04
$P_{-1,4} \times \text{exp}$	$R_{\max}$ , %	0.40	0.19	0.27
	$\langle R \rangle$ , %	0.11	0.03	0.03



Таблица П.4

Значения параметров аппроксимирования

Источник	$a_0 \times 10^{-3}$ , см	$a_1 \times 10^{-1}$	$a_2 \times 10^{-2}$ , см <sup>-1</sup>	$a_3 \times 10^{-3}$ , см <sup>-2</sup>	$a_4 \times 10^{-4}$ , см <sup>-3</sup>	$a_5 \times 10^{-7}$ , см <sup>-4</sup>	$a_6 \times 10^{-1}$ , см <sup>-1</sup>
BEBIG GI192M11	-4.03* 4.08	9.96 9.97	12.40 97.20	7.04 4.19	1.26 -0.31	0 -4.18	1.18 0.92
FlexiSource	-1.98 -2.38	9.94 9.95	10.92 5.62	5.53 1.16	2.29 -1.39	0 26.00	1.03 0.51
Gammamed 12i	-5.19 -5.29	9.97 9.98	12.08 13.53	6.89 9.03	0.94 2.05	0 33.41	1.16 1.32
Gammamed plus	-3.79 -3.79	9.96 9.96	12.14 12.16	6.82 6.84	0.95 0.96	0 0.17	1.16 1.16
Microselectron V1	-1.97 -1.97	9.92 9.92	13.12 13.03	7.39 7.35	0.20 0.20	0 -0.64	1.24 1.24
Microselectron V2	-2.28 0.66	9.85 9.90	13.22 16.34	6.29 12.91	0.16 0.29	0 203	1.19 1.54
SPEC M19	-2.62 -2.62	9.95 9.95	13.02 13.06	7.29 7.28	0.18 0.18	0 -0.10	1.23 1.23
VariSource Classic	-7.10 -9.75	9.98 10.0	11.12 14.07	5.39 11.07	3.07 1.27	0 86.6	1.02 1.37
VariSource V2000	1.34 1.35	9.87 9.87	13.11 13.23	6.44E-03 6.57E-03	1.39 1.46	0 1.29	1.18 1.19
Buchler G0814	10.10 10.10	9.78 9.78	15.09 15.07	7.24 7.24	3.64 3.64	0 0	1.32 1.32
BEBIG Ir2.A95-2 [6]	20.4 19.3	9.91 9.98	15.56 13.22	-0.48 10.51	0.00 0.90	0 260	0.16 1.48
BEBIG Ir2.A95-2 [7]	32.5 36.7	9.72 9.61	11.31 14.85	1.93 2.54	2.45 6.08	0 -0.21	1.10 1.36

Примечание. \*Первая строка – формула (6), вторая – формула (8).

Список литературы

1. Li Z., Das R. K., DeWerd L. A., Ibbott G. S., Meigooni A. S., Perez-Calatayud J., Rivard M. J., Sloboda R. S., Williamson J. F. Dosimetric prerequisites for routine clinical use of photon emitting brachytherapy sources with average energy higher than 50 keV // Med. Phys. 2007. Vol. 34. P. 37.
2. Nath R., Anderson L. L., Luxton G., Weaver K. A., Williamson J. F., Meigooni A. S. Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group № 43. American Association of Physicists in Medicine // Med. Phys. 1995. Vol. 22: P. 209.
3. Rivard M. J., Coursey B. M., DeWerd L. A., Hanson W. F., Huq M. S., Ibbott G. S., Mitch M. G., Nath R., Williamson J. F. Update of AAPM Task Group № 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations // Med. Phys. 2004. Vol. 31. P. 633.
4. Selvam T., Bhola S. Technical note : EGSnrc-based dosimetric study of the BEBIG 60Co HDR brachytherapy sources // Med. Phys. 2010. Vol. 37, iss. 3. P. 1365.
5. Taylor R., Rogers D. EGSnrc Monte-Carlo calculated dosimetry parameters for 192Ir and 169Yb brachytherapy sources // Med. Phys. 2008. Vol. 35, iss. 11. P. 28.
6. Vijande J., Granero D., Perez-Calatayud J., Ballester F. Monte-Carlo dosimetric study of the FlexiSource Co-60 high dose rate source // J. Contemp. Brachyther, 2012. Vol. 4, № 1. P. 34.
7. Ballester F., Granero D., Pérez-Calatayud J., Casal E., Agramunt S., Cases R. Monte-Carlo dosimetric study of the BEBIG Co-60 HDR source // Phys. Med. Biol. 2005. Vol. 50. P. 309.
8. Granero D., Perez-Calatayud J., Ballester F. Technical note: Dosimetric study of a new Co-60 source used in brachytherapy // Med. Phys. 2007. Vol. 34, iss. 9. P. 3485.
9. Pérez-Calatayud J., Granero D., Casal E., Ballester F., Puchades V. Monte-Carlo and experimental derivation of TG43 dosimetric parameters for CSM-type Cs-137 sources // Med. Phys. 2005. Vol. 32, iss. 1. P. 28.
10. Ballester F., Granero D., Pérez-Calatayud J., Casal E., Puchades V. Monte-Carlo dosimetric study of best industries and alpha omega Ir-192 brachytherapy seeds // Med. Phys. 2004. Vol. 31. P. 3298.



11. Casado F. J., García-Pareja S., Cenizo E., Mateo B., Bodineau C., Galán P. Dosimetric characterization of an <sup>192</sup>Ir brachytherapy source with the Monte–Carlo code PENELOPE // *Physica Med.* 2010. Vol. 26. P. 132.
12. Williamson J., Li Z. Monte–Carlo aided dosimetry of the microelectron pulsed and high dose-rate <sup>192</sup>Ir sources // *Amer. Assoc. Phys. Med.* 1995. Vol. 22, iss.6. P. 809.
13. Papagiannis P., Angelopoulos A., Pantelis E., Sakelliou L., Karaiskos P., Shimizu Y. Monte–Carlo dosimetry of <sup>60</sup>Co HDR brachytherapy sources // *Med. Phys.* 2003. Vol. 30. P. 712.
14. National Nuclear Data Center NuDat 2.6. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2> (дата обращения: 24.05.2016).
15. Granero D., Perez-Calatayud J., Pujades-Claumarchirant M. C., Ballester F., Melhus C. S., Rivard M. J. Equivalent phantom sizes and shapes for brachytherapy dosimetric studies of <sup>192</sup>Ir and <sup>137</sup>Cs // *Med. Phys.* 2008. Vol. 35. P. 4872–4877.
16. Furhang E. E., Anderson L. L. Functional fitting of interstitial brachytherapy dosimetry data recommended by the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group № 43. American Association of Physicists in Medicine // *Med. Phys.* 1999. Vol. 26. P. 153.
17. Moss D. Technical note : improved analytical fit to the TG-43 radial dose function, g(r) // *Med. Phys.* 2000. Vol. 27. P. 659.
18. Meigooni A. S., Zhang H., Perry C., Dini S. A., Kono R. A. Theoretical and experimental determination of dosimetric characteristics for brachyseed Pd-103, model Pd-1, source // *Appl. Radiat. Isot.* 2003. Vol. 58. P. 533.
19. Granero D., Perez-Calatayud J., Ballester F. Monte–Carlo calculation of the TG-43 dosimetric parameters of a new BEBIG Ir-192 HDR source // *Rad. Oncol.* 2005. Vol. 76. P. 79.
20. Taylor R. E. P., Rogers D. W. O. The CLRP TG-43 Parameter Database for Brachytherapy. URL: [http://www.physics.carleton.ca/clrp/seed\\_database/](http://www.physics.carleton.ca/clrp/seed_database/) (дата обращения: 24.05.2016).

#### Образец для цитирования:

Белосов А. В., Белянов А. А., Черняев А. П. Расчет и аппроксимация радиальной дозовой функции иридиевых источников // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика.* 2016. Т. 16, вып. 4. С. 203–211. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-203-211.

#### Calculation and Approximation of Radial Dose Function of Iridium Sources

A. V. Belousov<sup>1</sup>, A. A. Belianov<sup>2</sup>, A. P. Chernyaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Alexander V. Belousov, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, BelousovAV@physics.msu.ru

<sup>2</sup>Aleksandr A. Belianov, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, belyanov@cern.ch

<sup>3</sup>Alexander P. Chernyaev, Lomonosov Moscow State University Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, a.p.chernyaev@yandex.ru

**Background and Objectives:** The purpose of this paper is to investigate optimal fitting parameters for approximating radial dose function of Iridium sources. Calculations were performed using written by authors source code based on GEANT4 library package designed to simulate particle transport processes using Monte–Carlo method. **Results:** Following parameters of the source were determined: dose rate constant, radial dose function and anisotropy function. Obtained satisfactory coherence with other researchers' data. The data obtained using developed and verified code could be used in treatment planning system (TPS). In addition, this paper presents improved functional form for fitting radial dose function (RDF) brachytherapy sealed sources with Ir-192. Suggested functions allow for fitting RDF precisely in a range of 0,5–20 cm. Maximum deviations between fit data and Monte–Carlo simulation data don't exceed 0,6%, while average deviation is around 0,1%. Fitting coefficients for suggested functions are presented for 11 sources from different manufacturers.

**Conclusion:** Suggested functions are suitable for using in TPS to calculate radial dose distributions around sources more precisely, using broad range of data using TG-43 protocol.

**Key words:** brachytherapy sources, metod Monte–Carlo, method GEANT4, TG-43.

#### References

1. Li Z., Das R. K., DeWerd L. A., Ibbott G. S., Meigooni A. S., Perez-Calatayud J., Rivard M. J., Sloboda R. S., Williamson J. F. Dosimetric prerequisites for routine clinical use of photon emitting brachytherapy sources with average energy higher than 50 keV. *Med. Phys.*, 2007, vol. 34, pp. 37.
2. Nath R., Anderson L. L., Luxton G., Weaver K. A., Williamson J. F., Meigooni A. S. Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group no. 43. American Association of Physicists in Medicine. *Med. Phys.*, 1995, vol. 22, pp. 209.
3. Rivard M. J., Coursey B. M., DeWerd L. A., Hanson W. F., Huq M. S., Ibbott G. S., Mitch M. G., Nath R., Williamson J. F. Update of AAPM Task Group no. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations, *Med. Phys.*, 2004, vol. 31, pp. 633.
4. Selvam T., Bholá S. Technical note: EGSnrc-based dosimetric study of the BEBIG <sup>60</sup>Co HDR brachytherapy sources. *Med. Phys.*, 2010, vol. 37, iss. 3, pp. 1365.



5. Taylor R., Rogers D. EGSnrc Monte–Carlo calculated dosimetry parameters for  $^{192}\text{Ir}$  and  $^{169}\text{Yb}$  brachytherapy sources. *Med. Phys.*, 2008, vol. 35, iss. 11, pp. 28.
6. Vijande J., Granero D., Perez-Calatayud J., Ballester F. Monte–Carlo dosimetric study of the Flexisource Co-60 high dose rate source. *J. Contemp. Brachyther.*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 34.
7. Ballester F., Granero D., Pérez-Calatayud J., Casal E., Agramunt S., Cases R. Monte–Carlo dosimetric study of the BEBIG Co-60 HDR source. *Phys. Med. Biol.*, 2005, vol. 50, pp. 309.
8. Granero D., Perez-Calatayud J., Ballester F. Technical note: Dosimetric study of a new Co-60 source used in brachytherapy. *Med. Phys.*, 2007, vol. 34, iss. 9, pp. 3485.
9. Pérez-Calatayud J., Granero D., Casal E., Ballester F., Puchades V. Monte–Carlo and experimental derivation of TG43 dosimetric parameters for CSM-type Cs-137 sources. *Med. Phys.*, 2005, vol. 32, iss. 1, pp. 28.
10. Ballester F., Granero D., Pérez-Calatayud J., Casal E., Puchades V. Monte–Carlo dosimetric study of best industries and alpha omega Ir-192 brachytherapy seeds. *Med. Phys.*, 2004, vol. 31, pp. 3298.
11. Casado F. J., García-Pareja S., Cenizo E., Mateo B., Bodineau C., Galán P. Dosimetric characterization of an  $^{192}\text{Ir}$  brachytherapy source with the Monte–Carlo code PENELOPE. *Physica Med.*, 2010, vol. 26, pp. 132.
12. Williamson J., Li Z. Monte–Carlo aided dosimetry of the microselectron pulsed and high dose-rate  $^{192}\text{Ir}$  sources. *Amer. Assoc. Phys. Med.* 1995, vol. 22, iss. 6, pp. 809.
13. Papagiannis P., Angelopoulos A., Pantelis E., Sakelliou L., Karaiskos P., Shimizu Y. Monte–Carlo dosimetry of  $^{60}\text{Co}$  HDR brachytherapy sources. *Med. Phys.*, 2003, vol. 30, pp. 712.
14. *National Nuclear Data Center NuDat 2.6*. Available at: <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2> (accessed 24 May 2016).
15. Granero D., Perez-Calatayud J., Pujades-Claumarchirant M. C., Ballester F., Melhus C. S., Rivard M. J. Equivalent phantom sizes and shapes for brachytherapy dosimetric studies of  $^{192}\text{Ir}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . *Medical Physics*, 35, 4872–4877. *Med. Phys.*, 2008, vol. 35, pp. 4872.
16. Furhang E. E., Anderson L. L. Functional fitting of interstitial brachytherapy dosimetry data recommended by the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group no. 43. American Association of Physicists in Medicine. *Med. Phys.*, 1999, vol. 26, pp. 153.
17. Moss D. Technical note: improved analytical fit to the TG-43 radial dose function,  $g(r)$ . *Med. Phys.*, 2000, vol. 27, pp. 659.
18. Meigooni A. S., Zhang H., Perry C., Dini S. A., Koonna R. A. Theoretical and experimental determination of dosimetric characteristics for brachyseed Pd-103, model Pd-1, source. *Appl. Radiat. Isot.*, 2003, vol. 58, pp. 533.
19. Granero D., Perez-Calatayud J., Ballester F. Monte–Carlo calculation of the TG-43 dosimetric parameters of a new BEBIG Ir-192 HDR source. *Rad. Oncol.*, 2005, vol. 76, pp. 79.
20. Taylor R. E. P., Rogers D. W. O. The CLRP TG-43 Parameter Database for Brachytherapy. Available at: [http://www.physics.carleton.ca/clrp/seed\\_database/](http://www.physics.carleton.ca/clrp/seed_database/) (accessed 24 May 2016).

**Please cite this article in press as:**

Belousov A. V., Belianov A. A., Chernyaev A. P. Calculation and Approximation of Radial Dose Function of Iridium Sources. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 203–211. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-203-211.



# ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

УДК 621.315.592

## ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ $Sm$ НА ЭФФЕКТ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ $GeS$

Р. С. Мадатов<sup>1</sup>, А. С. Алекперов<sup>2</sup>, А. Э. Набиев<sup>2</sup>

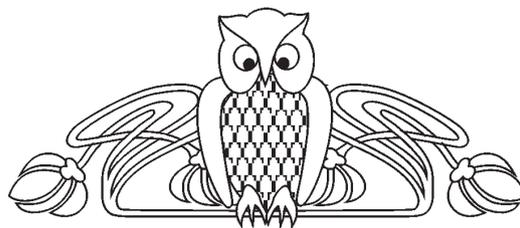
<sup>1</sup>Мадатов Рагим Селим оглы, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией радиационной физики полупроводников, Научно-исследовательский институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана, msrahim@mail.ru

<sup>2</sup>Алекперов Айдын Сафарбек оглы, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, Азербайджанский государственный педагогический университет, aydin60@inbox.ru

<sup>2</sup>Набиев Асаф Энвер оглы, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, Азербайджанский государственный педагогический университет, asaf.fizik@mail.ru

В последние годы возросло внимание к новым полупроводниковым материалам на основе  $A^{IV}B^{VI}$ . Среди них особый интерес представляют тонкие фоточувствительные пленки моносulfида германия. Недавно было создано уникальное устройство из  $GeS$ . Тонкие пластинки способны содержать большое количество ионов лития. Данный материал отлично подходит в качестве сырья при производстве солнечных панелей. Наряду с этим качеством тонкие пленки моносulfида германия обладают эффектами переключения и памяти. Тонкие пленки, полученные термическим испарением на холодных подложках, являются аморфными. Примеси редкоземельных элементов, в том числе атомы  $Sm$ , образуют зародыши кристаллизации. Несмотря на то что кристаллизация полностью не осуществляется по всему объему, фазовый переход обнаруживается в тонких пленках  $GeS:Sm$ . Характерными для этого эффекта является большая разница в сопротивлении высокоомного и низкоомного состояния, большое число циклов переключения, малые времена и энергии переключения. В ходе наших исследований было выявлено, что кратность изменения сопротивления при переключении равна  $10^5-10^6$ , время переключения  $\sim (10^{-6} \text{ с})$ , потребляемая энергия при переключении  $\sim (10^{-7} \text{ Дж})$ . Это обуславливает необходимость исследования основных закономерностей эффекта переключения проводимости в тонких пленках  $GeS:Sm$  с памятью, их зависимость от внешних факторов. В связи с этим были проведены исследования влияния температуры и освещения на эффект переключения в тонких пленках  $GeS:Sm$ .

**Ключевые слова:** тонкие пленки, моносulfид германия, примесные атомы, редкоземельные элементы, сэндвич-структура, эффект переключения и памяти, фазовый переход, кристалли-



зация, самокомпенсация, высокоомное и низкоомное состояние, комплексы и ассоциаты, уровни прилипания.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-212-217

### Введение

Повышенный интерес к слоистым кристаллам  $GeS$  обусловлен возможностью использования их в устройствах электрической памяти в качестве среды записи голограмм, создания на их основе солнечных ячеек [1]. Новый этап интенсивных исследований слоистых кристаллов  $GeS$  начался после того как исследователи из Университета штата Северная Каролина создали похожие на цветы структуры, имеющие чрезвычайно тонкие лепестки с большой поверхностной площадью. Атомная структура моносulfида германия очень хорошо поглощает солнечную энергию и может преобразовывать ее в полезное электричество. Такой материал отлично подходит в качестве сырья при производстве солнечных панелей и суперконденсаторов [2]. Наночастицы sulfида германия были синтезированы новым газофазным лазерным фотолизом и последующим термическим отжигом. Они показали отличную циклическую производительность для литий-ионных батарей с максимальной емкостью 1010 мАч после 100 циклов. Метастабильные тетрагональные фазы наночастиц  $Ge$  были предложены в качестве активных материалов для обратимого процесса экстракции [3]. Многослойный  $GeS$ -полевой транзистор (ПТ) демонстрирует удивительно высокий фотоотклик  $R_{\lambda} \sim 206 \text{ А/Вт}$  при освещении мощностью 1.5 мкВт на длине волны  $\lambda = 633 \text{ нм}$ , при напряжении на затворе  $V_3 = 0 \text{ В}$  и напряжении на контактах сток-исток  $V_{с.и} = 10 \text{ В}$ . Результат  $R_{\lambda} \sim 206 \text{ А/Вт}$  превосходит аналогичный параметр, полученный на



нанолентах на основе *GeS* и других слоистых материалах 4–5 групп полупроводниковых материалов. Многослойные *GeS* фотодетекторы имеют высокую внешнюю квантовую эффективность и характерную обнаружительную способность. Фотодетектор *GeS* также показывает отличную стабильность фотокоммутации в течение длительного периода эксплуатации ( $>1$  ч). Такие параметры, как высокая генерация фототока в широком спектральном диапазоне, длительная стабильность делают *GeS*-ПТ высококачественным фотодетектором для будущего применения в оптоэлектронных приборах [4].

Одним из наиболее перспективных приложений *GeS* считается использование этого полупроводникового материала в элементах с фазовой памятью. Как утверждают авторы [5], современные материалы для фазовой памяти должны удовлетворять следующим требованиям:

- в обычных условиях материал должен существовать как в аморфной, так и в кристаллической фазе;

- удельное сопротивление аморфной и кристаллической фаз должны отличаться не менее чем на порядок;

- материал должен выдерживать большое количество переключений.

Проведенные нами рентгенографические и микроструктурные анализы показывают, что тонкие пленки, полученные термическим испарением на сапфировых подложках, являются аморфными. Удельное сопротивление этих пленок примерно в  $10^2$  раз превышает удельное сопротивление кристаллов соответствующего состава. Кристаллы *GeS* всегда вырастают с высокой концентрацией ( $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) катионных вакансий, формируют *p*-тип проводимости. Введение примесных атомов *Sm* в решетку *GeS* приводит к «залечиванию» катионных вакансий, что позволяет значительно варьировать его электрические свойства. Локализуясь в вакансиях, атомы *Sm* отдают свои валентные электроны халькогену, уменьшая тем самым общую концентрацию дырок, приводя к резкому увеличению удельного сопротивления. Явление, которое заключается в ограничении концентрации носителей тока в полупроводнике по сравнению с концентрацией основной легирующей примеси, называется самокомпенсацией (СК). Эффективность СК определяется такими параметрами, как ширина запрещенной зоны, ионный радиус примеси, энергия связи атомов в решетке. Более

широкозонные материалы с более «мягкой» решеткой или в случае аморфных полупроводников подвергаются СК в большей степени [6]. *GeS* с шириной запрещенной зоны 1.65 эВ и аморфной модификации обладает таким качеством. Возможность получения очень низких концентраций носителей тока с помощью СК позволяет использовать этот метод для изготовления тонких фоточувствительных пленок.

Редкоземельные элементы (РЗЭ), в том числе *Sm*, активно взаимодействуют с элементами VI группы и образуют сложные комплексы и ассоциаты [7]. Отдельные РЗЭ и сложные комплексы образуют зародыши кристаллизации, что способствует осуществлению фазового перехода. Подобный эффект не наблюдается в тонких пленках моносulfида германия из-за отсутствия локальных центров кристаллизации. Поэтому полупроводниковый материал *GeS:Sm* считается более подходящим материалом для электронных ключей, чем матрица *GeS*.

#### Образцы и методика эксперимента

В качестве исходного материала для напыления был использован поликристал  $Ge_{0,995}Sm_{0,005}S$ , синтезированный методом прямого сплавления самария маркой Смм-2 и сопротивлением 50 Ом·см и серы маркой «В-5» путем загрузки их в кварцевую ампулу длиной 10–20 см и диаметром 1.5 см. Ампула откачивалась до давления  $10^{-3}$  мм рт. ст. и запаивалась. Во избежание взрыва германий был измельчен в порошок и количество вещества было ограничено до 10 г.

Процесс синтеза осуществлялся в два этапа: на первом этапе ампула нагревалась в печи марки СУОЛ-1 со скоростью 3–5°C/мин до 300°C и выдерживалась при этой температуре 10–12 часов. На втором этапе температура повышалась со скоростью 2–3°C/мин до полного плавления самария (1072°C) и выдерживалась при этой температуре 18–20 часов. Долговременные выдержки ампулы при такой температуре позволили получить однородные поликристаллы [8].

Образцы для измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) представляли собой «сэндвич» структуры *GeS:Sm*. Нижним электродом структуры служила сапфировая подложка, покрытая серебром путем напыления. В качестве верхнего точечного электрода использовался игольчатый прижимной электрод из серебра площадью  $5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$ . Тонкие пленки *GeS:Sm* осаждались на поверхность нижнего электрода



методом вакуумного испарения из единого источника, в котором помещался порошок заранее синтезированного поликристалла. Испарение исходного вещества проводилось в ростовой камере вакуумного универсального поста ВУП-5, откачанной до давления  $10^{-6}$  мм рт. ст. В качестве испарителя использовался нагреваемый электрическим током кварцевый цилиндр. Держатель подложек размещался непосредственно над испарителем на расстоянии 10–15 см. Фазовый состав полученных аморфных пленок исследовался методом дифракции рентгеновских лучей с использованием дифрактометра *D8 ADVANCE* на излучении  $CuK_{\alpha}$  ( $\lambda=1.5418$  Å) с измерением 2 $\theta$  в диапазоне от 10 до  $100^{\circ}$  и шагом  $0.01^{\circ}$ . Морфология пленок исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа *SIGMA VP MAT* (производитель *Carl Zeiss Microscopy*, Германия). Пленки *GeS:Sm* имели гладкую поверхность без трещин и пор и плотно покрывали поверхность подложки. Было установлено, что состав аморфных пленок соответствует исходному кристаллическому соединению  $Ge_{0.995}Sm_{0.005}S$ .

Вольт-амперные характеристики пленок толщиной 1 мкм исследовались на импульсном напряжении. Импульсы напряжения пилообразной формы частотой 1 кГц подавались на образец и последовательно с ним соединенное сопротивление нагрузки. Сопротивление нагрузки изменялось от 500 Ом до 50 кОм. Для исследования ис-

ходных характеристик использовался генератор импульсов Г5-78. Величина тока определялась с помощью двухлучевого осциллографа С1-55 по напряжению на сопротивление нагрузки, а напряжение на образце – как разность поданного напряжения и напряжения на нагрузке.

### Результаты эксперимента

Вольт-амперная характеристика тонких пленок *GeS:Sm* толщиной 1 мкм, изготовленных методом термического испарения, имеют S-образный вид с явно выраженной областью отрицательного дифференциального сопротивления. При малых напряжениях электрического поля исследуемые образцы находились в высокоомном состоянии ( $10^{10} - 10^{11}$  Ом.см). С увеличением прикладываемого напряжения ток через образец растет по линейному закону, т.е. выполняется закон Ома, затем – по степенному с показателем 2–4 и далее по экспоненциальному закону. При определенном напряжении, которое называется напряжением переключения ( $U_{th}$ ), ток увеличивается скачком (рис. 1). Величина скачкообразного изменения тока зависит от сопротивления образца, а также от внешних факторов, прежде всего от температуры и освещенности (рис. 2).

Наблюдаемый нами эффект переключения является запоминающим. Как в высокоомном, так и в низкоомном состоянии электрической «памяти» образцы находились длительное время.

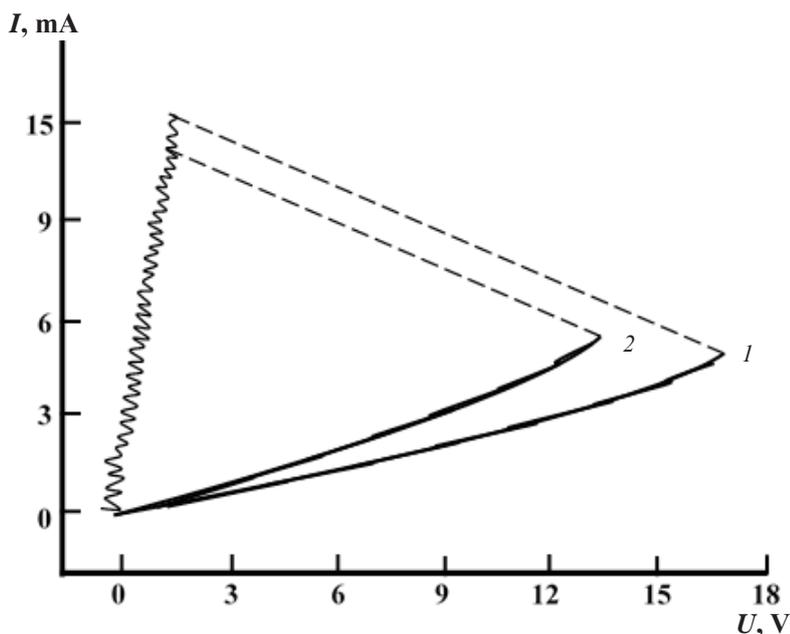


Рис. 1. ВАХ тонких пленок *GeS:Sm* при разных температурах: 1 – 80 К; 2 – 300 К

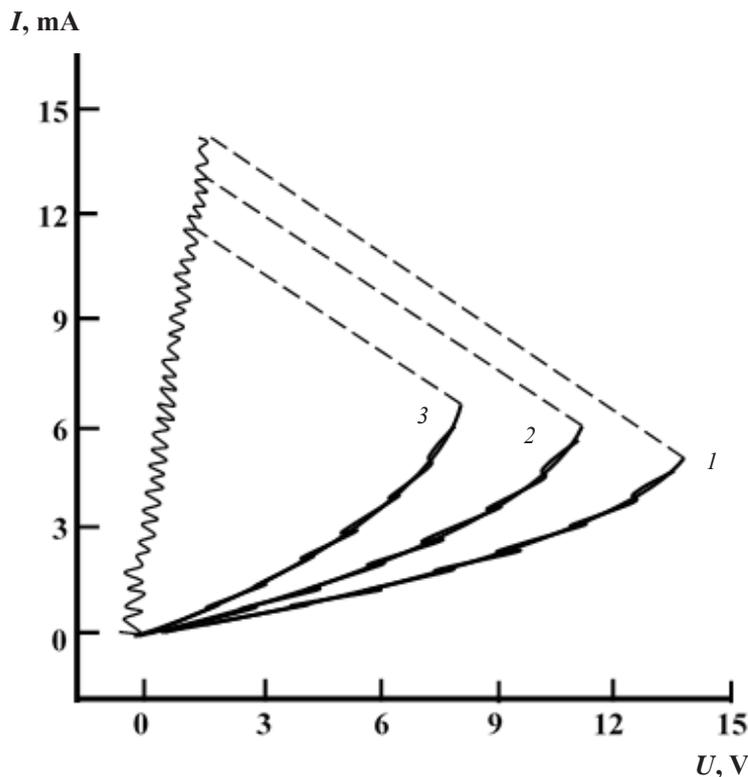


Рис. 2. ВАХ тонких пленок  $GeS : Sm$  при разном освещении света:  
 1 –  $\Phi=0$ ; 2 –  $\Phi=10^3$ лк; 3 –  $\Phi=10^4$ лк

### Обсуждение результатов

В настоящее время существуют две точки зрения на природу эффекта переключения в тонких пленках. Сторонники первой теории объясняют эффект переключения обратимым электронно-тепловым пробоем [9]. По другой теории природа эффекта переключения чисто электронная [10]. Н. Мотт и Э. Дэвис [11] считали, что высокая концентрация носителей  $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в низкоомном состоянии не может быть достигнута в результате термической или ударной ионизации и причиной является инжекция электронов и дырок через контакты.

В высокоомных материалах исследование электропроводности усложняется тем, что выше определенной напряженности приложенного электрического поля начинается сильная инжекция носителей из контактов и создаются пространственные заряды [12]. При малых значениях напряжения инжекция носителей из электрода пренебрежимо мала и ток подчиняется закону Ома. При отсутствии ловушек ток ограничивается пространственным зарядом, а концентрация свободных носителей, инжектируемая из электрода, существенно превалирует над термической равновесной концентрацией

носителей и ВАХ подчиняется закону Чайлда–Ленгмюра:

$$I = \epsilon \epsilon_0 \mu U^2 / d^3.$$

Здесь  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\mu$  – подвижность носителей тока,  $U$  – напряжение между электродами,  $d$  – толщина пленки. В случае, когда имеются только мелкие ловушки, в любой момент времени свободной оказывается лишь некоторая часть носителей, инжектируемых из электрода, остальные носители захватываются ловушками. Наличие большого количества примесей приводит к накоплению вакантных мест в полупроводнике и появлению локализованных состояний в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны. Таким образом, наличие мелких ловушек приводит к резкому уменьшению концентрации носителей в зоне проводимости. Однако ток в этом случае все еще подчиняется квадратичному закону зависимости от напряжения. Неупорядоченные системы содержат также глубокие ловушки. При определенном значении напряжения для данного материала все ловушки оказываются заполненными, и вновь инжектируемые носители попадают в зону проводимости, а ток увеличивается по экспоненциальному



закону. Наконец, при напряжении переключения осуществляется фазовый переход и полупроводник переходит в низкоомное металлическое состояние. В неупорядоченных системах добиться кристаллизации весьма трудно. Поэтому приходится добавлять специальные примеси, которые служат центрами кристаллизации. Редкоземельные элементы склонны к образованию таких центров [13]. В этом случае легко осуществляется кристаллизация-превращение полупроводника (аморфного вещества) в металл (кристаллическое вещество).

Наряду со структурой материала на эффект переключения как внешние факторы действуют температура и освещенность образца. Как видно из рис. 1, с повышением температуры пороговое напряжение, с которого начинается область, перемещается в область низких значений. Это показывает, что резкое возрастание тока обусловлено в основном ионизацией локальных уровней в поле. Аналогичные изменения происходят и в случае, когда на тонкую пленку аморфного материала падает белый свет (см. рис. 2) с разной интенсивностью. Это можно объяснить объемным механизмом носителей при переходе из одной системы в другую.

### Заключение

Проведенные нами рентгенографические и микроструктурные анализы подтверждают, что полученные материалы являются аморфными. Для применения эффекта переключения и памяти надо искать не материалы, которые легко аморфизируются, а материалы, которые быстро кристаллизуются. В неупорядоченных системах кристаллизация идет очень медленно. Чтобы осуществить быструю кристаллизацию таких тонких пленок, как *GeS*, нам пришлось легировать моносulfид германия атомами *Sm*. Этим способом удалось создать устойчивую систему с эффектом переключения и памяти.

### Образец для цитирования:

Мадатов Р. С., Алекперов А. С., Набиев А. Э. Влияние примесных атомов *Sm* на эффект переключения в тонких пленках *GeS* // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 212–217. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-212-217.

### Influence of *Sm* Impurity Atoms on the Switching Effect in Thin Films of *GeS*

R. S. Madatov<sup>1</sup>, A. S. Alekperov<sup>2</sup>, A. E. Nabiyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Madatov Ragim Selim oqly, Institute of Radiation Problems of the National Academy Sciences of Azerbaijan, 9B, Vakhbade str., Baku, 1143, Azerbaijan, msrahim@mail.ru

### Список литературы

1. Блецкан Д. И., Кабацкий В. Н., Блецкан М. М. Фотоэлектрический датчик наведения солнечных батарей на солнце // Современные информационные и электронные технологии : материалы Международ. науч.-практ. конф. Одесса, 2015. С. 228–229.
2. Chun Li., Liang H., Gayatni P., Yifei Yu., Linyou Cao. Role of Boundary Layer Diffusion in Vapor Deposition Growth of Chalcogenide Nanosheets the Case of GeS // ACS Nano. 2012. Vol. 6, № 10. P. 8868–8877.
3. Yong J. Ch., Hyung S. I., Yoon M., Chang H. K., Han S. K., Seung H. B., Young R. L., Chan S. J., Dong M. J., Jeung P., Eun H. Ch., Min S. S., Won I. Ch. Germanium Sulfide (II and IV) Nanoparticles for Enhanced Performance of Lithium Ion Batteries // Chemical Commun. 2013. Vol. 49. P. 4661–4663.
4. Rajesh K. U., Yi-Ying L., Chia-Yung K., Srinivasa R. T., Raman S., Karunakara M. B., Ankur A. High Photosensitivity and Broad Spektral Response of Multi-Layered Germanium Sulfide Transistors // Nanoscale. 2016. Vol. 8. P. 2284–2292.
5. Богославский Н. А., Цендин К. Д. Физика эффектов переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, вып. 5. С. 577–608.
6. Агринская Н. В., Машовец Т. В. Самокомпенсация в полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 1994. Т. 2, вып. 9. С. 1505–1533.
7. Мастеров В. Ф., Захаренков А. В. Редкоземельные элементы в полупроводниках АЗВ5 // Физика и техника полупроводников. 1990. Т. 24, вып. 4. С. 610–630.
8. Madatov R. S., Alekperov A. S., Magerremova Dzh. A. Influence of Rare Earth Elements (Nd, Sm, Gd) on the Physicochemical Properties of GeS Crystal // Crystallography Reports. 2015. Vol. 60, № 6. P. 921–923.
9. Чабан И. А. Эффект переключения в халькогенидных стеклах // Физика твердого тела. 2007. Т. 49, вып. 3. С. 405–410.
10. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников. М. : Мир, 1991. 670 с.
11. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М. : Мир, 1982. 534 с.
12. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М. : Мир, 1979. 416 с.
13. Spedding F. H., Daane A. H. The Rare Earths. N.Y. ; L. : John Wiley Sons, Inc., 1965. 608 p.

<sup>2</sup>Alekperov Aydin Safarbek oqly, Azerbaijan State Pedagogical University, 68, U. Gadzhibekli str., Baku, 1000, Azerbaijan, aydin60@inbox.ru

<sup>2</sup>Nabiyev Asef Enver oqly, Azerbaijan State Pedagogical University, 68, U. Gadzhibekli str., Baku, 1000, Azerbaijan, asaf.fizik@mail.ru



**Background and Objectives:** Nowadays interest has grown considerably to AivBvi type semiconductor media. Among them there is a special interest to the thin photosensitive films of germanium mono-sulfide. So, GeS thin layers have the ability to contain a large number of lithium ions. Therefore, it is possible to prepare the items: solar cells and super condenser. There are no limitations for practical applications of GeS crystal. Prospects of such semiconductor films are determined by the possibility of holographic recording and effects of switching and memory. Cold sapphire substrate obtained by using the method of thermal evaporation of the GeS:Sm thin layers is an amorphous structure. Impurities of rare-earth elements as additives, as well as a thin layer of amorphous of Sm atoms creates crystallization centers. Despite the fact that the crystallization is not fully implemented throughout the volume, it can provide the process of transition from high-ohmic resistance to low-ohmic resistance state. **Results:** The research shows that one resistance of transition differs from the other  $\sim 10^5$ – $10^6$  times, the transition period is  $\sim 10^{-6}$  sec, energy is  $\sim 10^{-7}$ J. All this shows that effects of switching and memory observed on GeS: Sm thin layer meet the modern technical requirements. The influence of external factors such as temperature and lighting has been investigated.

**Key words:** thin films, germanium monosulfide, impurity atoms, rare-earth elements, sandwich-structure, switching effect, phase transition, crystallization.

## References

1. Bletskan D. I., Kabatsiy V. N., Bletskan M. M. Photoelektrik Sensor of Guidance of Solar Batteries to the Sun. *Sovremenniy informatsionniye i elektronniye tehnologii: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern Information and Electronic Technologies. International Conf.]. Odessa, 2015, pp. 228–229 (in Russian).
2. Chun Li., Liang H., Gayatni P., Yifei Yu., Linyou Cao. Role of Boundary Layer Diffusion in Vapor Deposition Growth of Chalcogenide Nanosheets: The Case of GeS. *ACS Nano*, 2012, vol. 6, no. 10, pp. 8868–8877.
3. Yong J. Ch., Hyung S. I., Yoon M., Chang H. K., Han S. K., Seung H. B., Young R. L., Chan S. J., Dong M. J., Jeung P., Eun H. Ch., Min S. S., Won I. Ch. Germanium Sulfide (II and IV) Nanoparticles for Enhanced Performance of Lithium Ion Batteries. *Chemical Communications*, 2013, vol. 49, pp. 4661–4663.
4. Rajesh K. U., Yi-Ying L., Chia-Yung K., Srinivasa R. T., Raman S., Karunakara M. B., Ankur A. High Photosensitivity and Broad Spektral Response of Multi-Layered Germanium Sulfide Transistors. *Nanoscale*, 2016, vol. 8, pp. 2284–2292.
5. Bogoslavsky N. A., Tsendin K. D. Physics of Change-Over and Memory Effects in Chalcogenide Glass-like Semiconductors. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, iss. 5, pp. 577–608.
6. Agrinskaya N. V., Mashovets T. V. Self-compensation in Semiconductors. *Semiconductors*, 1994, vol. 28, iss. 9, pp. 1505–1533.
7. Masterov V. F., Zakharenko A. V. Rare-earth Elements in Semiconductors. *Semiconductors*, 1990, vol. 24, iss. 4, pp. 610–630.
8. Madatov R. S., Alekperov A. S., Magerremova Dzh. A. Influence of Rare Earth Elements (Nd, Sm, Gd) on the Physicochemical Properties of GeS Crystal. *Crystallography Reports*, 2015, vol. 60, no. 6, pp. 921–923.
9. Chaban I. A. Change-over Effect in Chalcogenide Glasses. *Solid State Physics*, 2007, vol. 49, iss. 3, pp. 405–410.
10. Meden A., Sho M. *Fizika i primeneniye amorfnykh poluprovodnikov* [Physics and Use of Amorphous Semiconductors]. Moscow, Mir, 1982. 534 p. (in Russian).
11. Mott N., Davis E. *Elektronniye prosessi v nekrystallicheskiy veshstvax* [Electronic Processes in Non-Crystalline Materials]. Moscow, Mir, 1979. 534 p. (in Russian).
12. Lampert M., Mark P. *Inzhekcionnyye toki v tverdykh telakh* [Current Injection in Solids. Hard cover]. Moscow, Mir, 1979. 416 p. (in Russian).
13. Spedding F. H., Daane A. H. *The Rare Earths*. New York; London: John Wiley Sons, Inc., 1965. 608 p.

## Please cite this article in press as:

Madatov R. S., Alekperov A. S., Nabiyev A. E. Influence of Sm Impurity Atoms on the Switching Effect in Thin Films of GeS. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 212–217. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-212-217.

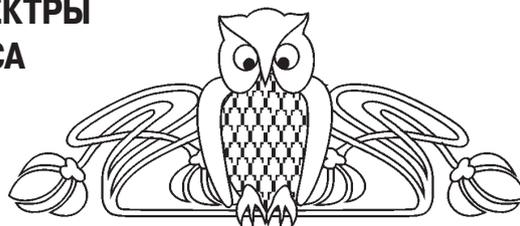


## БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

УДК 539.194; 539.196.3

### ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДНОЙ СВЯЗИ НА ИК-СПЕКТРЫ И СТРУКТУРУ МОЛЕКУЛЯРНОГО КОМПЛЕКСА АЛМАЗОПОДОБНЫХ НАНОЧАСТИЦ И АЗОТИСТЫХ ОСНОВАНИЙ ДНК

А. Н. Бокарев<sup>1</sup>, И. Л. Пластун<sup>2</sup>, К. Е. Агандеева<sup>3</sup>



<sup>1</sup>Бокарев Андрей Николаевич, аспирант кафедры физики, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., andreybokarev@mail.ru

<sup>2</sup>Пластун Инна Львовна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационной безопасности автоматизированных систем, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., inna\_pls@mail.ru

<sup>3</sup>Агандеева Ксения Евгеньевна, аспирант кафедры информационной безопасности автоматизированных систем, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., akcinika2410@gmail.com

На основе молекулярного моделирования методом теории функционала плотности проанализировано влияние водородных связей на ИК-спектры и структуру молекулярного комплекса, образующегося при взаимодействии комплементарной пары азотистых оснований ДНК и алмазоподобных наночастиц. В качестве примера рассматривается взаимовлияние комплементарной пары аденин-тимин и адамантана, окружённого карбоксильными группами. Актуальность подобного исследования обусловливается тем, что в настоящее время алмазоподобные наночастицы находят всё большее применение в различных сферах науки и техники. В частности, ведутся активные разработки в области использования наночастиц как адсорбентов, биомаркеров, средств доставки лекарств и в других биомедицинских приложениях. Методом численного моделирования с помощью программного комплекса Gaussian были получены спектры и оптимизированная структура комплекса аденин-тимин-карбоксилированный адамантан. Проведено сравнение с экспериментальными данными. На основе полученных результатов исследовано межмолекулярное взаимодействие и структура водородных связей в образующемся молекулярном комплексе, что позволяет сделать выводы о возможностях взаимодействия алмазоподобных наночастиц с ДНК на молекулярном уровне.

**Ключевые слова:** молекулярное моделирование, ИК-спектр, структура, наночастицы, азотистые основания ДНК, водородная связь, карбоксильная группа, аденин, тимин, адамантан, алмазоподобный наночастица.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-218-227

#### Введение

В настоящее время множество исследований в различных сферах науки связано с изучением биомолекул и их взаимодействия с углеродными наночастицами. Одной из наиболее интенсивно развивающихся научных отраслей, связанных с нанотехнологиями, является применение наноструктур в биологии и медицине [1]. В частности, существенный интерес представляет использование алмазоподобных соединений, называемых алмазоподобными соединениями или наноалмазами [2, 3], в качестве средства доставки лекарственных и диагностических препаратов (см., например, [1]), стимуляторов активности фагоцитов [3], адсорбентов [4] и биомаркеров [1, 2]. Подобные возможности достигаются за счёт образования комплексных соединений с биомолекулами, к которым можно отнести, например, альбумин [4] или азотистые основания ДНК [5, 6] – аденин, тимин, гуанин и цитозин.

Оптические и физико-химические свойства молекулярных ансамблей, состоящих из углеродных наночастиц и азотистых оснований ДНК, позволяют рассматривать эти соединения как эффективное средство повышения скорости доставки лекарственных препаратов и адсорбции тяжёлых металлов. Детальные исследования таких комплексов ранее не проводились, и анализ структуры и физико-химических свойств подобных соединений, учитывая их высокую практическую направленность, был бы весьма актуальным. Ранее нами исследовалась поляризуемость и оптические свойства подобных комплексов [7].

В представленной работе основной целью является исследование влияния водородных связей на оптические характеристики молекуляр-



ных комплексов, образующихся при соединении комплементарных азотистых оснований ДНК с алмазоподобными наночастицами при помощи анализа ИК-спектров комплементарной пары аденин-тимин и адамантана.

Азотистые основания представляют собой органические соединения, являющиеся основными структурными составляющими ДНК и РНК. В проводимых исследованиях были рассмотрены два основания – аденин ( $C_5H_5N_5$ ) и тимин ( $C_5H_6N_2O_2$ ), которые образуют комплементарную пару. Данные соединения играют важную роль в работе живых организмов, выполняя множество биохимических функций.

В настоящее время существенный интерес представляет использование частиц группы наноаллотропов углерода в различных сферах науки и техники. По происхождению выделяют три семейства алмазоподобных наночастиц – минеральные (диамантоиды), космические (метеоритные) и искусственные (например, ультрадисперсные детонационные наноалмазы – УДА) [8].

Диамантоиды – наименьшие алмазоподобные углеводородные кластеры размером  $\sim 1$  нм, первоначально выделенные из нефти, но затем были разработаны методы их синтеза [8]. Эти молекулы представляют собой каркасы из нескольких десятков атомов углерода, замкнутых на концах атомами водорода [8].

Наименьшим по размерам диамантоидом является адамантан – насыщенный трициклический мостиковый углеводород с формулой  $C_{10}H_{16}$  [9]. Большое внимание к адамантану обусловлено его уникальной структурой и физико-химическими свойствами, при этом его углеродная решётка может являться «строительным блоком» для других алмазоподобных структур, в том числе наноалмазов, а каркасная «оболочка» адамантана позволяет инкапсулировать внутрь этой молекулы различные атомы и ионы [8]. В настоящее время синтезированы различные производные адамантана [9], которые нашли большое практическое применение в биологии, медицине, технике и материаловедении. В частности, на основе адамантана разработаны полимерные материалы и композиты с улучшенными эксплуатационными свойствами, лекарственные препараты и термостабильные смазочные материалы.

Достаточно подробно исследовано влияние водородных связей на колебательные спектры комплементарной пары аденин-тимин [5,6] и спектральные характеристики искусственных наноалмазов [2, 10, 11], а также диамантоидов [8, 10, 11].

Химический состав поверхности алмазоподобных соединений оказывает решающее влияние на их поведение в различных технологических процессах, в связи с этим возникает необходимость в модификации поверхности наноалмазов, что обычно выполняется путём присоединения полярных групп, в частности, карбоксильных групп  $COOH$ . Исследований, посвящённых анализу межмолекулярного взаимодействия комплементарной пары аденин-тимин и алмазоподобных соединений, ранее не проводилось.

### 1. Моделирование структуры и ИК-спектров

Процедуры молекулярного моделирования алмазоподобных наночастиц требуют большого количества вычислительных ресурсов и времени в зависимости от сложности структуры и числа атомов углерода в её составе. По этой причине успешное моделирование крупных алмазоподобных структур в соединении с различными биомолекулами достаточно проблематично. В связи с этим встаёт вопрос о возможности использования в расчётах алмазоподобных наночастиц только небольшого размера.

В данной работе в процессе молекулярного моделирования мы использовали модель простейшего диамантоида – адамантана. Выбор адамантана обусловлен тем, что углеродная решётка данного соединения является базовым «строительным» элементом для алмазоподобных соединений большего размера [8].

Для рассмотрения взаимодействия комплементарной пары аденин-тимин с модифицированной алмазоподобной наночастицей в рассматриваемом модельном объекте все атомы водорода в структуре адамантана были заменены на карбоксильные группы  $COOH$ . Таким образом, к адамантану было присоединено 16  $COOH$ -групп, поскольку молекула адамантана включает в себя 16 атомов водорода. Структура «чистого» адамантана и адамантана, обогащённого карбоксильными группами, показана на рис. 1 а, б.

В процессе молекулярного моделирования было исследовано влияние водородных связей, возникающих между азотистыми основаниями ДНК аденином и тиминном в комплементарной паре (их структура показана на рис. 1, в), на форму ИК-спектров этих соединений. Кроме того, было рассмотрено влияние водородных связей на ИК-спектры молекулярного комплекса, образованного комплементарной парой аденин-тимин и алмазоподобной наночастицей, представляющей собой полностью карбоксилированный адамантан.

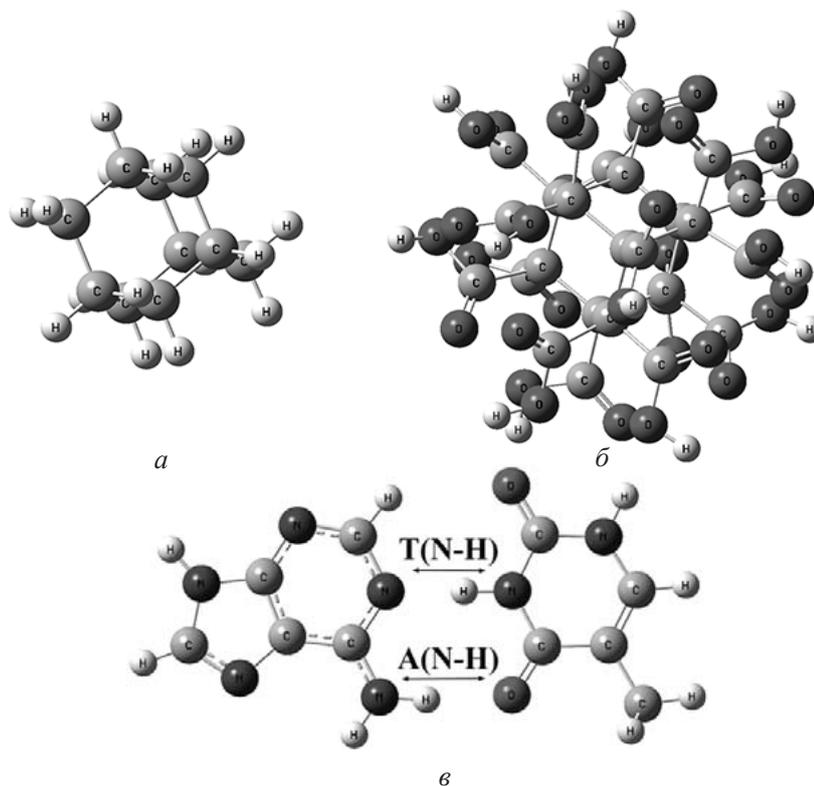


Рис. 1. Структура «чистого» адамантана (а), адамантана, обогащённого 16 карбоксильными группами COOH (б) и комплементарной пары аденин (слева) – тимин (справа) (в)

Моделирование структуры и расчёт спектров молекулярных соединений осуществлялись на основе метода теории функционала плотности (ТФП) [12] с использованием функционала B3LYP [12, 13] и базисного набора 6-31G, в котором атомные орбитали электронов внутренней оболочки аппроксимируются шестью гауссовыми функциями,  $M=6$ , а орбитали валентной оболочки описываются соответственно тремя ( $N=3$ ) и одной ( $P=1$ ) гауссовой функцией. В расчётах был использован программный комплекс Gaussian 09 [14], который широко применяется для решения задач молекулярного моделирования в различных сферах вычислительной физики и химии.

В результате использования в расчётах гармонического приближения полученные данные спектров имеют некоторое расхождение с экспериментальными данными. Для учёта ангармонизма во взаимодействии и соответственно снижения степени расхождения между экспериментальными и вычисленными данными необходимо использовать масштабирующие множители для рассчитанных частот. Путём сравнения рассчитанных ИК-спектров аденина и тимина с экспериментальными данными [5] нами

были выведены и использованы в данной работе следующие масштабирующие множители: 0.857 (диапазон 0–1000  $\text{cm}^{-1}$ ); 0.983 (диапазон 1000–2000  $\text{cm}^{-1}$ ); 0.949 (диапазон выше 2000  $\text{cm}^{-1}$ ).

## 2. Обсуждение результатов

Рассмотрим высокочастотные области рассчитанных ИК-спектров аденина (рис. 2) и тимина (рис. 3). Видно, что в спектрах проявляются резонансы, соответствующие валентным колебаниям связи N-H, участвующей в образовании водородной связи в комплементарной паре аденин-тимин, структура которой показана на рис. 1, в.

После использования масштабирующих коэффициентов видно (см. рис. 2 и рис. 3) хорошее совпадение рассчитанных спектров с экспериментальными данными, взятыми из работы [5].

В высокочастотной области рассчитанного ИК-спектра аденина частота 3439  $\text{cm}^{-1}$  (A(N-H)) соответствует валентным симметричным колебаниям группы  $\text{NH}_2$ , одна из связей N-H которой при объединении аденина с тиминном в комплементарную пару будет участвовать в образовании водородной связи между ними.

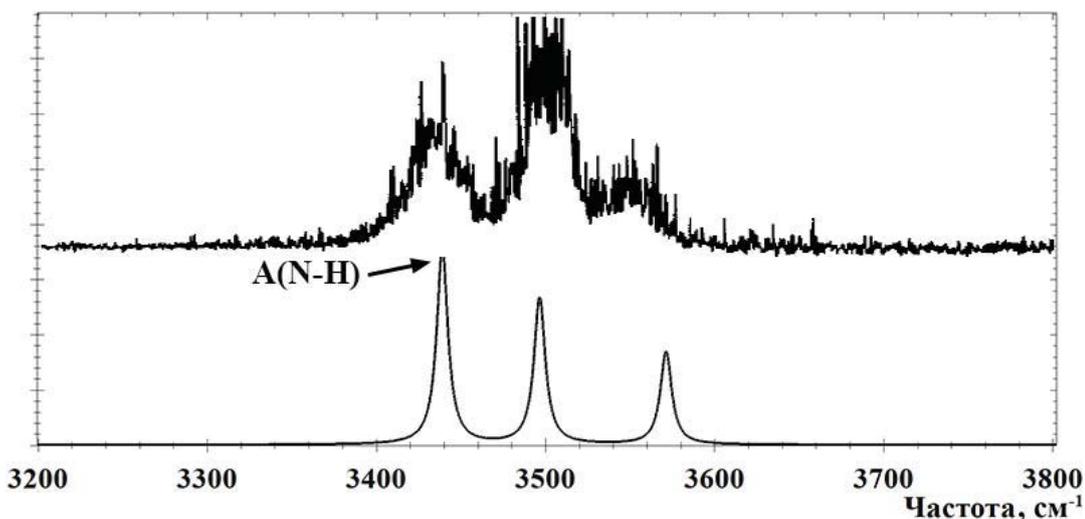


Рис. 2. Экспериментальный (вверху) и рассчитанный (внизу) ИК-спектры аденина

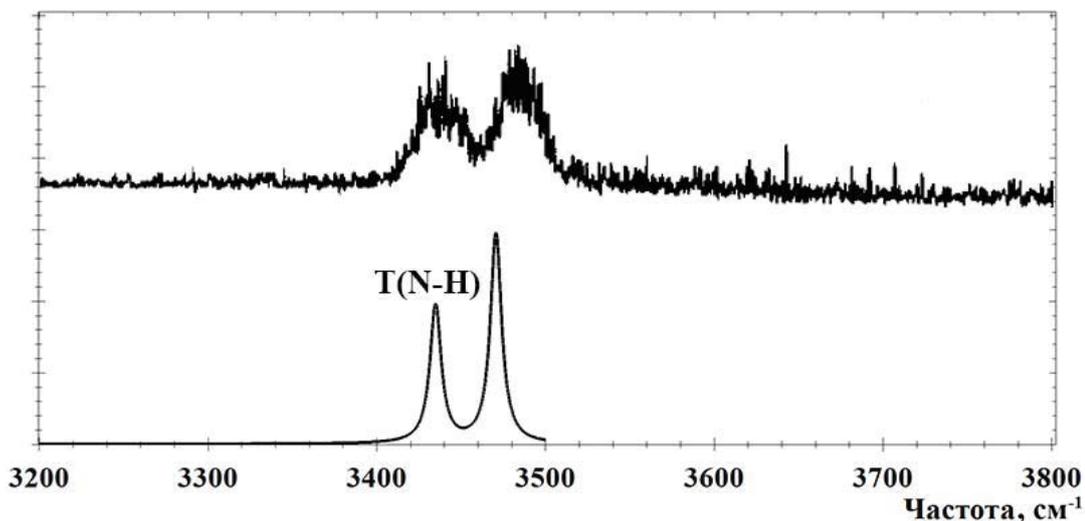


Рис. 3. Экспериментальный (вверху) и рассчитанный (внизу) ИК-спектры тимина

В ИК-спектре тимина частота  $3434\text{см}^{-1}$  (T(N-H)) соответствует валентным колебаниям связи N-H, которая при объединении тимина с аденином будет участвовать в образовании водородной связи в комплементарной паре.

В полученном ИК-спектре адамантана с 16 карбоксильными группами (рис. 4) можно выделить 3 характеристические области, которые соответствуют валентным колебаниям связей C-O, C=O и O-H в COOH-группах. Это диапазоны частот от  $1000$  до  $1200\text{см}^{-1}$ , от  $1600$  до  $1800\text{см}^{-1}$  и от  $3400$  до  $3600\text{см}^{-1}$ . При этом частоты наиболее интенсивных пиков в диапазонах составляют  $1136$ ,  $1728$ ,  $3456\text{см}^{-1}$ .

Выделенные в рассчитанном ИК-спектре характеристические области хорошо согласуются

с соответствующими областями в экспериментальном ИК-спектре наноалмаза, обогащённого карбоксильными группами (рис. 4).

Экспериментальные данные предоставлены лабораторией лазерной спектроскопии растворов супрамолекулярных соединений и наноструктур (руководитель Т. А. Доленко) физического факультета Московского государственного университета.

Видно, что в экспериментальном спектре хорошо заметны резонансы на частотах от  $2850$  до  $2950\text{см}^{-1}$ , которые отсутствуют в рассчитанном спектре. Эти частоты соответствуют валентным колебаниям связей C-H, что свидетельствует о неполном замещении атомов водорода на карбоксильные группы в структуре наноалмаза,

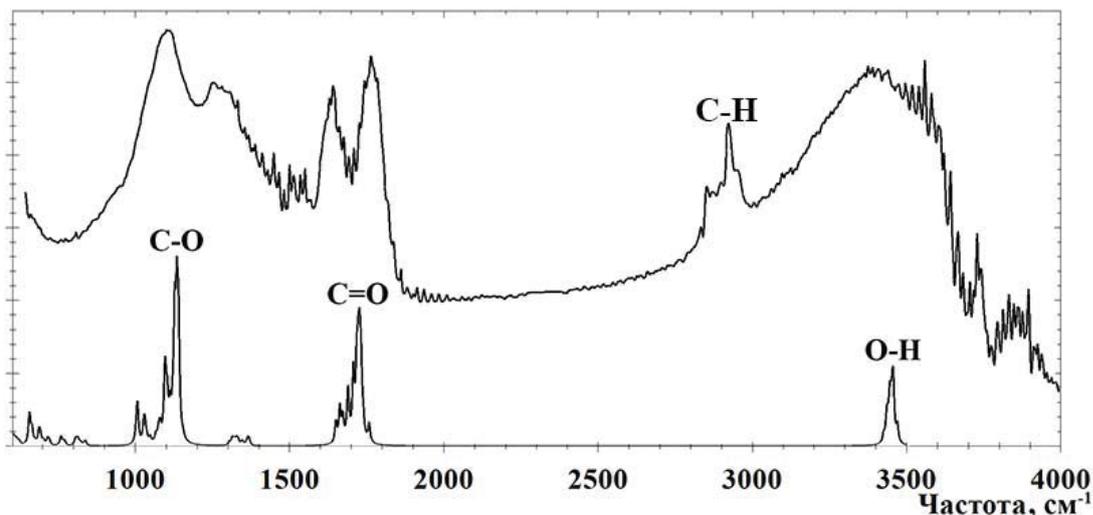


Рис. 4. Экспериментальный ИК-спектр наноалмаза, обогащённого карбоксильными группами (вверху) и рассчитанный ИК-спектр адамантана с 16 карбоксильными группами (внизу)

используемого в эксперименте, в отличие от теоретической модели, где замещение полное.

При соединении в комплементарную пару между аденином и тиминном возникают 2 водородных связи, как отмечается в [6]. В

рассчитанном ИК-спектре комплементарной пары (рис. 5) хорошо видны частоты, соответствующие колебаниям связей в аденине и тимине, участвующих в образовании водородных связей.

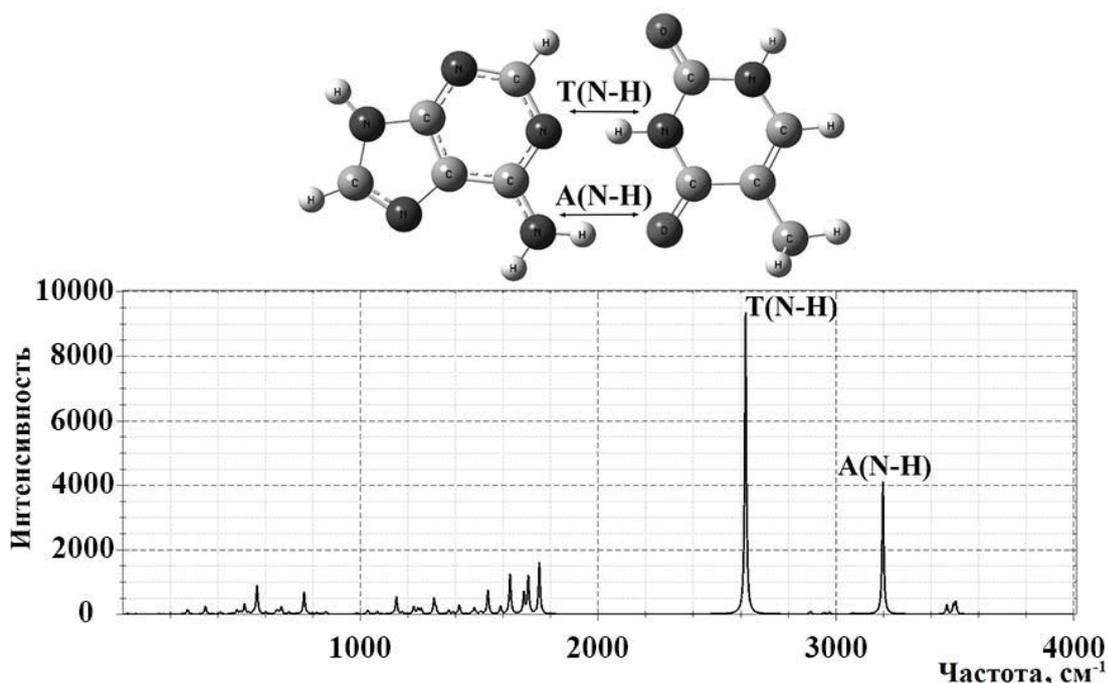


Рис. 5. Структура (вверху) и рассчитанный ИК-спектр (внизу) комплементарной пары аденин-тимин

Частота  $2621 \text{ см}^{-1}$  (T(N-H)) соответствует валентным колебаниям связи N-H в тимине, участвующей в образовании водородной связи с аденином, а частота  $3199 \text{ см}^{-1}$  (A(N-H)) соот-

ветствует валентным симметричным колебаниям группы  $\text{NH}_2$  в аденине, одна из N-H связей которой участвует в образовании водородной связи с тиминном.



В результате проведённых расчётов для соединений комплементарной пары с адамантаном, содержащим 16 карбоксильных групп, было обнаружено, что молекула карбоксилированного адамантана присоединяется к комплементарной паре только через тимин, и между ними образуются 2 водородных связи.

В рассчитанном ИК-спектре для комплементарной пары с адамантаном, содержащим 16 карбоксильных групп (рис. 6), валентные колебания связи O-H в адамантане и связи N-H в тимине, участвующие в образовании водородных связей с тимином и аденином соответственно, происходят одновременно на частотах 2551 и 2586  $\text{см}^{-1}$  (обозначены как T(N-H) и O-H\*

соответственно), а валентные колебания связи N-H в тимине, участвующей в образовании водородной связи с адамантаном, происходят на частоте 3030  $\text{см}^{-1}$  (T(N-H)\*), частоты колебаний смещаются влево. При этом частота A(N-H), соответствующая валентным симметричным колебаниям группы  $\text{NH}_2$  в аденине, одна из N-H связей которого участвует в образовании водородной связи с тимином, смещается влево на частоту 3192  $\text{см}^{-1}$ . По сравнению с ИК-спектром адамантана с 16 карбоксильными группами (см. рис. 4) границы характерных областей и частоты наиболее интенсивных резонансов для адамантана практически не изменяются – 1125, 1729 и 3461  $\text{см}^{-1}$ .

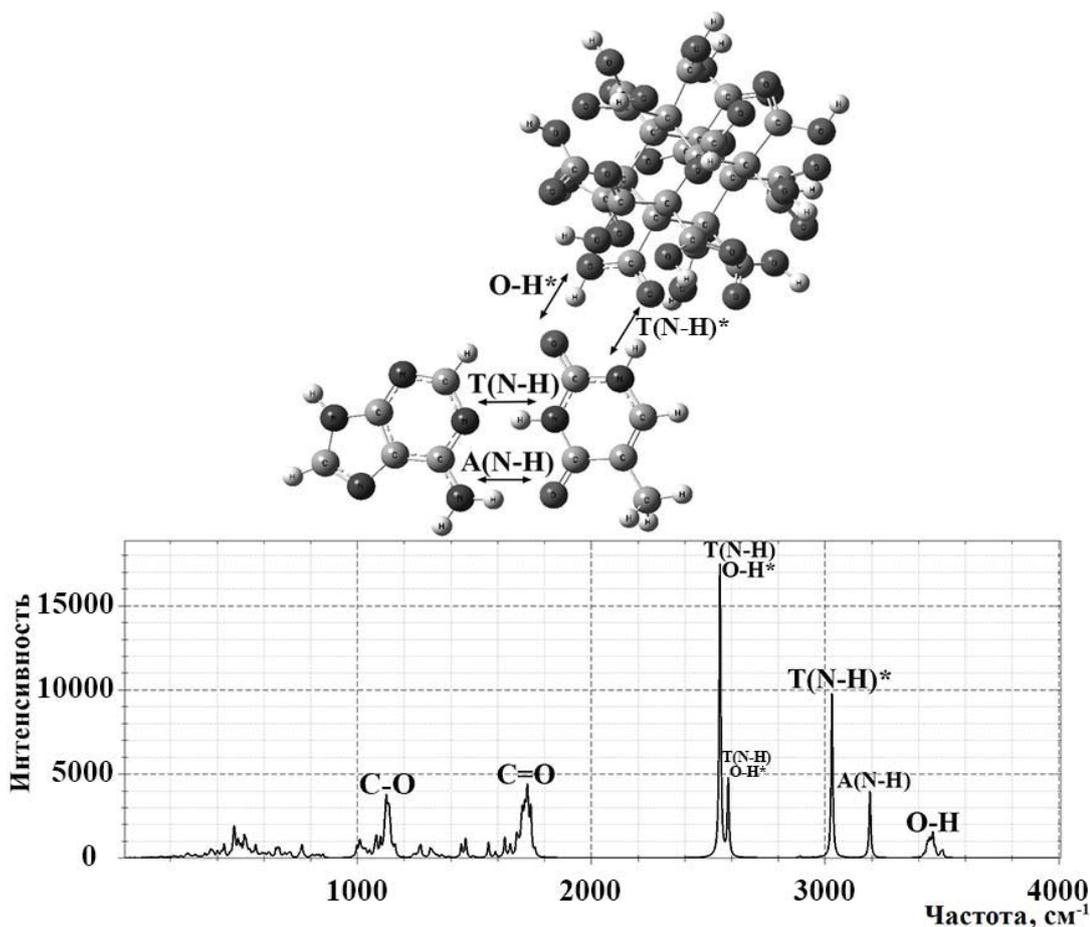


Рис. 6. Структура (вверху) и рассчитанный ИК-спектр (внизу) комплементарной пары с адамантаном, содержащим 16 COOH-групп

Рассмотрим динамику изменения рассчитанных значений геометрических параметров связей, участвующих в образовании водородных связей между молекулами, и величины сдвигов частот колебаний таких связей для выбранного состава молекулярных соединений.

В табл. 1 приведены параметры группы  $\text{NH}_2$  в аденине и длина водородной связи, образующейся при объединении аденина с тимином.

При объединении в комплементарную пару связь N-H из группы  $\text{NH}_2$  в аденине участвует в образовании водородной связи с тимином, что



Таблица 1

**Расчитанные параметры группы NH<sub>2</sub> в аденине и длины возникающей водородной связи при объединении с тиминном**

Соединение	R <sub>N-H</sub> , Å	R <sub>H...O</sub> , Å	ν <sub>NH<sub>2</sub></sub> , см <sup>-1</sup>	Δν, см <sup>-1</sup>
Аденин	1.00675	–	3439	–
Аденин + Тимин	1.02427	1.87348	3199	240
Аденин + Тимин + Адамантан с 16 COOH-группами	1.02458	1.8596	3192	247

Примечание. Используются следующие обозначения: R<sub>N-H</sub> – длина связи N-H в группе NH<sub>2</sub>, которая участвует в образовании водородной связи с тиминном, R<sub>H...O</sub> – длина образующейся водородной связи между атомом водорода в аденине и атомом кислорода в тимине, ν<sub>NH<sub>2</sub></sub> – частота валентных симметричных колебаний группы NH<sub>2</sub>, Δν – величина сдвига частоты валентных симметричных колебаний группы NH<sub>2</sub> в молекулярном комплексе относительно чистого аденина.

отражается появлением частотного сдвига в длинноволновую область в размере 240 см<sup>-1</sup>, как это видно из табл. 1, при этом длина образовавшегося мостика составляет 1.87348 Å. Стоит также заметить, что параметры данных связей практически

не изменяются после объединения комплементарной пары с карбоксилированным адамантаном.

В табл. 2 приведены параметры связи N-H в тимине и длина водородной связи, образующейся при объединении тимина с аденином.

Таблица 2

**Расчитанные параметры связи N-H в тимине и длины возникающей водородной связи с аденином**

Соединение	R <sub>N-H</sub> , Å	R <sub>H...N</sub> , Å	ν <sub>NH</sub> , см <sup>-1</sup>	Δν, см <sup>-1</sup>
Тимин	1.01261	–	3434	–
Аденин + Тимин	1.05998	1.71828	2621	813
Аденин + Тимин + Адамантан с 16 COOH-группами	1.06334	1.71033	2551; 2586	883; 848

Примечание. Используются следующие обозначения: R<sub>N-H</sub> – длина связи N-H, которая участвует в образовании водородной связи с аденином, R<sub>H...N</sub> – длина образующейся водородной связи между атомом водорода в тимине и атомом азота в аденине, ν<sub>NH</sub> – частота валентных колебаний связи N-H, Δν – величина сдвига частоты валентных колебаний связи N-H в молекулярном комплексе относительно чистого тимина.

При объединении в комплементарную пару связь N-H в тимине участвует в образовании водородной связи с аденином, что отражается появлением частотного сдвига в длинноволновую область в размере 813 см<sup>-1</sup>, как это видно из табл. 2. Длина образовавшегося водородного мостика составляет 1.71828 Å. После объединения комплементарной пары с карбоксилированным адамантаном происходит увеличение значения частотного сдвига в длинноволновую область, при этом валентные колебания связи N-H в тимине происходят сразу на двух частотах, что свидетельствует о том, что в комплементарной паре именно тимин имеет возможность присоединения к карбоксилированной наночастице. В связи с этим необходимо рассмотреть параметры связи N-H в тимине и новой водородной связи, образующейся при

объединении тимина с карбоксилированным адамантаном. Эти параметры приведены в табл. 3.

После объединения комплементарной пары с карбоксилированным адамантаном наблюдается сдвиг частоты валентных колебаний связи N-H в тимине в длинноволновую область величиной 440 см<sup>-1</sup>, что свидетельствует об образовании достаточно устойчивой водородной связи. Длина образовавшегося мостика составляет 1.71158 Å.

Также необходимо рассмотреть взаимодействие тимина и карбоксилированного адамантана со стороны адамантана. В табл. 4 приведены параметры связи O-H в карбоксилированном адамантане и длина водородной связи, образующейся при объединении карбоксилированного адамантана с тиминном.



Таблица 3

**Рассчитанные параметры связи N-H в тимине и длины возникающей водородной связи с карбоксилированным адамантаном**

Соединение	$R_{N-H}$ , Å	$R_{H...O}$ , Å	$\nu_{NH}$ , $cm^{-1}$	$\Delta\nu$ , $cm^{-1}$
Тимин	1.00913	–	3470	–
Аденин + Тимин	1.00926	–	3466	–
Аденин + Тимин + Адамантан с 16 COOH-группами	1.03575	1.71158	3030	440

Примечание. Используются следующие обозначения:  $R_{N-H}$  – длина связи N-H, которая участвует в образовании водородной связи с карбоксилированным адамантаном,  $R_{H...O}$  – длина образующейся водородной связи между атомом водорода в тимине и атомом кислорода в карбоксилированном адамантане,  $\nu_{NH}$  – частота валентных колебаний связи N-H,  $\Delta\nu$  – величина сдвига частоты валентных колебаний связи N-H в молекулярном комплексе относительно чистого тимина и комплементарной пары.

Таблица 4

**Рассчитанные параметры связи O-H в карбоксилированном адамантане и длины возникающей водородной связи с тиминном**

Соединение	$R_{O-H}$ , Å	$R_{H...O}$ , Å	$\nu_{OH}$ , $cm^{-1}$	$\Delta\nu$ , $cm^{-1}$
Адамантан с 16 COOH-группами	0.98009	–	3448	–
Аденин + Тимин + Адамантан с 16 COOH-группами	1.03078	1.55286	2551; 2586	897; 862

Примечание. Используются следующие обозначения:  $R_{O-H}$  – длина связи O-H, которая участвует в образовании водородной связи с тиминном,  $R_{H...O}$  – длина образующейся водородной связи между атомом водорода в карбоксилированном адамантане и атомом кислорода в тимине,  $\nu_{OH}$  – частота валентных колебаний связи O-H,  $\Delta\nu$  – величина сдвига частоты валентных колебаний связи O-H в молекулярном комплексе относительно карбоксилированного адамантана без комплементарной пары.

**Выводы**

После объединения карбоксилированного адамантана с комплементарной парой аденин-тимин валентные колебания связи O-H в адамантане происходят сразу на двух частотах, при этом величины сдвигов для этих частот достаточно существенны – 897 и 862  $cm^{-1}$ , что свидетельствует об образовании сильной водородной связи. Длина образовавшегося мостика составляет 1.55286 Å.

Сравнивая полученные значения из приведённых выше таблиц, можно сделать вывод, что из всех образующихся связей в молекулярном комплексе наиболее сильной является водородная связь между адамантаном и тиминном, в образовании которой принимает участие связь O-H в адамантане, а наиболее слабой является водородная связь между аденином и тиминном в комплементарной паре, образующаяся с участием связи N-H из группы  $NH_2$  в аденине.

Таким образом, возникающая сильная водородная связь позволяет создавать достаточно прочные соединения карбоксилированного адамантана и тимина, что даёт возможность использовать указанное соединение как средство повышения скорости и направленности доставки

лекарственных средств на молекулярном уровне, как адсорбент и как средство диагностики и маркирования ДНК [15].

**Список литературы**

1. Гонсалвес К., Хальберштадт К., Лоренсин К., Нацир Л. Наноструктуры в биомедицине. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 519 с.
2. Долматов В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и применение // Успехи химии. 2001. Т.70, № 7. С. 687–708.
3. Karpukhin A. V., Avkhacheva N. V., Yakovlev R. Yu., Kulakova I. I., Yashin V. A., Lisichkin G. V., Safronova V. G. Effect of detonation nanodiamonds on phagocyte activity // Cell Biology International. 2011. Vol. 35, № 7. P. 727–733. DOI: 10.1042/CBI20100548.
4. Самсонова Ю. С., Приезжев А. В., Луговцов А. Е., Петрова Г. П., Гибизова В. В., Е И.-Щ., Су Т.-Х., Переведенцева Е. В., Ченг Ч.-Л. Исследование взаимодействия молекул альбумина с наночастицами алмазов в водных растворах методом динамического рассеяния света // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 6. С. 484–488.
5. Colarusso P., Zhang K.-Q., Guo B., Bernath P. F. The infrared spectra of uracil, thymine, and adenine in the gas phase // Chemical Physics Letters. 1997. Vol. 269. P. 39–48. DOI: 10.1016/S0009-2614(97)00245-5.



6. Тен Г. Н., Нечаев В. В., Панкратов А. Н., Березин В. И., Баранов В. И. Влияние водородной связи на структуру и колебательные спектры комплементарных пар оснований нуклеиновых кислот. II. Аденин-тимин // Журн. структ. хим. 2010. Т. 51, № 5. С. 889–895.
7. Bokarev A. N., Plastun I. L. Polarizing properties of molecules ensembles – new approaches to calculations // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9917. P. 99172C. DOI: 10.1117/12.2229801.
8. Беленков Е. А., Ивановская В. В., Ивановский А. Л. Наноалмазы и родственные углеродные наноматериалы. Компьютерное материаловедение. Екатеринбург : УрО РАН, 2008. 169 с.
9. Багрий Е. И. Адамтанты : Получение, свойства, применение. М. : Наука, 1989. 264 с.
10. Filik J., Harvey J. N., Allan N. L., May P. W., Dahl J. E. P., Shenggao L., Carlson R. M. K. Raman spectroscopy of diamondoids // Spectrochim. Acta. Part A : Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2006. Vol. 64, iss. 3. P. 681–692.
11. Байдакова М. В., Кукушкина Ю. А., Ситникова А. А., Яговкина М. А., Кириленко Д. А., Соколов В. В., Шестаков М. С., Вуль А. Я., Zousman B., Levinson O. Структура наноалмазов, полученных методом лазерного синтеза // Физика твердого тела. 2013. Т. 55, № 8. С.1633–1639.
12. Кон В. Электронная структура вещества – волновые функции и функционалы плотности // Успехи физических наук. 2002. Т.172, № 3. С. 336–348.
13. Полл Дж. А. Квантово-химические модели // Успехи физических наук. 2002. Т. 172, № 3. С. 349–356.
14. Frisch M. J., Trucks G. W., Cheeseman J. R., Scalmani G., Caricato M., Hratchian H. P., Li X., Barone V., Bloino J., Zheng G., Vreven T., Montgomery J. A., Petersson Jr. G. A., Scuseria G. E., Schlegel H. B., Nakatsuji H., Izmaylov A. F., Martin R. L., Sonnenberg J. L., Peralta J. E., Heyd J. J., Brothers E., Ogliaro F., Bearpark M., Robb M. A., Mennucci B., Kudin K. N., Staroverov V. N., Kobayashi R., Normand J., Rendell A., Gomperts R., Zakrzewski V. G., Hada M., Ehara M., Toyota K., Fukuda R., Hasegawa J., Ishida M., Nakajima T., Honda Y., Kitao O., Nakai H. Gaussian 09, Revision A.02. Wallingford CT, Gaussian Inc., 2009. 989 p.
15. Dolenko T. A., Burikov S. A., Laptinskiy K. A., Sarmanova O. E. Improvement of the fidelity of molecular DNA computations: control of DNA duplex melting using raman spectroscopy // Laser Physics. 2016. Vol. 26, № 2. 25206.

#### Образец для цитирования:

Бокарев А. Н., Пластун И. Л., Агандеева К. Е. Влияние водородной связи на ИК-спектры и структуру молекулярного комплекса алмазоподобных наночастиц и азотистых оснований ДНК // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 218–227. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-218-227.

#### Influence of the Hydrogen Bond on the IR-spectrum and Structure of Molecular Complex of Diamond Nanoparticles and DNA Bases

A. N. Bokarev<sup>1</sup>, I. L. Plastun<sup>2</sup>, K. E. Agandeeva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Andrey N. Bokarev, Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, 77, Politechnicheskaya str., Saratov, 410054, Russia, andreybokarev@mail.ru

<sup>2</sup>Inna L. Plastun, D.S., Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, 77, Politechnicheskaya str., Saratov, 410054, Russia, inna\_pls@mail.ru

<sup>3</sup>Kseniya E. Agandeeva, Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, 77, Politechnicheskaya str., Saratov, 410054, Russia, akcinika2410@gmail.com

**Background and Objectives:** Using molecular modeling by the density functional theory method we analyze a hydrogen bonds formation and their influence on IR-spectrum and structure of molecular complex which is formed as the interaction of complementary couple of DNA nucleobases adenine and thymine and nanodiamonds surrounded with carboxylic groups. As an example of nanodiamonds adamantane has been used. Intermolecular forces and structure of hydrogen bonds are investigated. In present time diamond-like nanoparticles are increasingly used in various fields of science and technology so investigations in that field of nanoparticle science is actual. In particular, active development of nanoparticles as adsorbents, biomarkers, drug delivery vehicles and in other biomedical applications can be clearly seen. **Materials and Methods:** Adenine-thymine-carboxylated adamantane complex

spectra and optimization were obtained by numerical simulation using the Gaussian software. Obtained data meets experimental results well. **Results:** Intermolecular interactions and hydrogen bonding structure in the obtained molecular complex were examined. Possibilities of interaction of diamond nanoparticles with DNA at the molecular level were considered.

**Key words:** molecular modeling, IR-spectrum, nanodiamond, DNA nucleobases, hydrogen bond, carboxylic group, nanoparticles, adenine, adamantane, thymine, diamondoid.

#### References

1. Gonsalves K., Halberstadt C., Laurensin C., Nair L. *Biomedical nanostructures*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2008. 515 p.
2. Dolmatov V. Yu. Detonation synthesis ultradispersed diamonds: properties and applications. *Russian Chemical Reviews*, 2001, vol. 70, no. 7, pp. 687–708.
3. Karpukhin A. V., Avkhacheva N. V., Yakovlev R. Yu., Kulakova I. I., Yashin V. A., Lisichkin G. V., Safronova V. G. Effect of detonation nanodiamonds on phagocyte activity. *Cell Biology International*, 2011, vol. 35, no. 7, pp. 727–733. DOI: 10.1042/CBI20100548.
4. Samsonova Y. S., Petrova G. P., Gibizova V. V., Priezhnev A. V., Lugovtsov A. E., Ye Y. -S., Su T. -H., Perevedentseva E. V., Cheng C. -L. Investigation of interaction of albumin molecules with diamond nanoparticles in aqueous by dynamic light scattering. *Quantum Electronics*, 2012, vol. 42, no. 6, pp. 484–488.



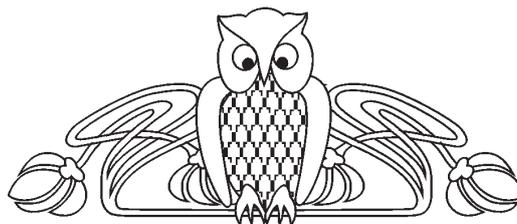
5. Colarusso P., Zhang K.-Q., Guo B., Bernath P.F. The infrared spectra of uracil, thymine, and adenine in the gas phase. *Chemical Physics Letters*, 1997, vol. 269, pp. 39–48. DOI: 10.1016/S0009-2614(97)00245-5.
6. Ten G. N., Nechaev V. V., Pankratov A. N., Berezin V. I., Baranov V. I. Effect of hydrogen bonding on the structure and vibrational spectra of complementary pairs of nucleic acid bases. II. adenine-thymine. *Journal of Structural Chemistry*, 2010, vol. 51, no. 5, pp. 854–861.
7. Bokarev A. N., Plastun I. L. Polarizing properties of molecules ensembles - new approaches to calculations. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9917, pp. 99172C. DOI: 10.1117/12.2229801.
8. Belenkov E. A., Ivanovskaya V. V., Ivanovsky A. L. *Nanoalmazy i rodstvennye uglernodnye nanomaterialy. Komp'uternoe materialovedenie* [Nanodiamonds and related carbon nanomaterials. Computer materials science]. Ekaterinburg, UrO RAS, 2008. 169 p. (in Russian).
9. Bagrii E. I. *Adamantany: Poluchenie, svoistva, primeneniye* [Adamantanes: synthesis, properties and application], Moscow, Science, 1989. 264 p. (in Russian).
10. Filik J., Harvey J. N., Allan N. L., May P. W., Dahl J. E. P., Shenggao L., Carlson R. M. K. Raman spectroscopy of diamondoids. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2006, vol. 64, pp. 681–692.
11. Baidakova M. V., Kukushkina Y. A., Sitnikova A. A., Yagovkina M. A., Kirilenko D. A., Sokolov V. V., Shestakov M. S., Vul' A. Y., Zousman B., Levinson O. Structure of nanodiamonds prepared by laser synthesis. *Physics of the Solid State*, 2013, vol. 55, no. 8, pp. 1747–1753.
12. Kohn W. The electronic structure of matter: wave functions and density functionals. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2002, vol. 172, no. 3, pp. 336–348.
13. Pople J. Quantum chemical models. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2002, vol. 172, no. 3, pp. 349–356.
14. Frisch M. J., Trucks G. W., Cheeseman J. R., Scalmani G., Caricato M., Hratchian H. P., Li X., Barone V., Bloino J., Zheng G., Vreven T., Montgomery J. A., Petersson Jr. G. A., Scuseria G. E., Schlegel H. B., Nakatsuji H., Izmaylov A. F., Martin R. L., Sonnenberg J. L., Peralta J. E., Heyd J. J., Brothers E., Ogliaro F., Bearpark M., Robb M. A., Mennucci B., Kudin K. N., Staroverov V. N., Kobayashi R., Normand J., Rendell A., Gomperts R., Zakrzewski V. G., Hada M., Ehara M., Toyota K., Fukuda R., Hasegawa J., Ishida M., Nakajima T., Honda Y., Kitao O., Nakai H. *Gaussian 09, Revision A.02*. Wallingford CT, Gaussian Inc., 2009. 989 p.
15. Dolenko T. A., Burikov S. A., Laptinskiy K. A., Sarmanova O. E. Improvement of the fidelity of molecular DNA computations: control of DNA duplex melting using raman spectroscopy. *Laser Physics*, 2016, vol. 26, no. 2, 25206.

**Please cite this article in press as:**

Bokarev A. N., Plastun I. L., Agandeeva K. E. Influence of the Hydrogen Bond on the IR-spectrum and Structure of Molecular Complex of Diamond Nanoparticles and DNA Bases. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 218–227. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-218-227.

УДК 577.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В СВЯЗИ МЕЖДУ КОНТУРАМИ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ У ЗДОРОВОГО ЧЕЛОВЕКА МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАЗОВОЙ ДИНАМИКИ



**В. С. Хорев<sup>1</sup>, А. Р. Киселев<sup>2</sup>, В. А. Шварц<sup>3</sup>,  
Е. Е. Лапшева<sup>4</sup>, В. И. Пономаренко<sup>5</sup>, М. Д. Прохоров<sup>6</sup>,  
В. И. Гриднев<sup>7</sup>, А. С. Караваев<sup>8</sup>**

<sup>1</sup>Хорев Владимир Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, khorevvs@gmail.com

<sup>2</sup>Киселев Антон Робертович, доктор медицинских наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; ведущий научный сотрудник отдела продвижения новых кардиологических

информационных технологий научно-исследовательского института кардиологии, Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского; ведущий научный сотрудник отделения хирургического лечения интерактивной патологии, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии имени А. Н. Бакулева, antonkis@list.ru

<sup>3</sup>Шварц Владимир Александрович, кандидат медицинских наук, научный сотрудник отделения хирургического лечения интерактивной патологии, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии имени А. Н. Бакулева, vashvarts@bakulev.ru



<sup>4</sup>Лапшева Елена Евгеньевна, старший преподаватель кафедры информатики и программирования, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, lapsheva@yandex.ru

<sup>5</sup>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 лаборатории моделирования в нелинейной динамике, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, ponomarenkovi@gmail.com

<sup>6</sup>Прохоров Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, mdprokhorov@yandex.ru

<sup>7</sup>Гриднев Владимир Иванович, доктор медицинских наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; руководитель отдела продвижения новых кардиологических информационных технологий научно-исследовательского института кардиологии, Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского, gridnev@cardio-it.ru

<sup>8</sup>Караваев Анатолий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; старший научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, karavaevas@gmail.com

Метод диагностики связанности колебательных систем, основанный на построении прогностических моделей динамики мгновенных фаз, использован для диагностики временных задержек в связях между контурами регуляции частоты сердечных сокращений и тонуса артериальных сосудов, демонстрирующих у здоровых людей колебания с характерными периодами около 10 секунд. В ходе анализа двухчасовых экспериментальных записей здоровых испытуемых выявлено наличие значимого двунаправленного взаимодействия с временным запаздыванием порядка единиц секунд в связях между исследуемыми системами.

**Ключевые слова:** фазовая динамика, диагностика связанности, временное запаздывание, регуляторная система, сердечно-сосудистая система, вегетативная регуляция.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-227-237

## Введение

Регуляция сердечно-сосудистой системы (ССС) человека отделами вегетативной нервной системы играет важнейшую роль в обеспечении функционирования организма в различных условиях его работы [1]. При этом состоянию здоровья соответствует баланс активности раз-

личных регуляторных контуров, выстраиваемый в результате их сложного взаимодействия. Нарушения вегетативной регуляции, в том числе под действием внешних факторов, ассоциированы с развитием различных патологических состояний, например, вегетососудистой дистонии и артериальной гипертонии [2]. Как было показано ранее в наших работах [3, 4], особенности взаимодействия между регуляторными контурами являются чувствительными маркерами при поражении различных органов и систем организма, и количественный анализ свойств таких связей и результатов их действия весьма перспективен для развития диагностических методов [5–7]. Кроме того, такие исследования важны для получения фундаментальных знаний об устройстве ССС, которые необходимы для понимания механизмов ее работы в норме и патологии в различных режимах функционирования организма. Наконец, изучение особенностей взаимодействия регуляторных систем необходимо для построения математических моделей ССС, что открывает широкие перспективы для решения фундаментальных задач физиологии и прикладных медицинских задач [8–11].

До недавнего времени принципиальные ограничения на использование инвазивных (требующих внедрения в организм) измерений при работе с живыми системами делали исследования особенностей взаимодействия контуров регуляции ССС практически невозможными. Однако развитие вычислительной техники и нелинейно-динамических методов анализа и обработки сигналов сложных систем открыло возможности для исследования сложной коллективной динамики регуляторных систем и изучения особенностей построения связей между ними.

В данной работе перспективный метод диагностики связанности колебательных систем, основанный на построении прогностических моделей динамики мгновенных фаз, использовался для диагностики временных задержек в связях между контурами регуляции частоты сердечных сокращений и тонуса артериальных сосудов, демонстрирующих колебания с характерными периодами около 10 секунд. Впервые подобный анализ был осуществлен при анализе длительных записей здоровых субъектов, содержащих более 700 характерных периодов колебаний, что позволило улучшить статистические свойства оценок рассчитываемых индексов и сделать новые выводы о характере взаимодействия исследуемых систем.



### 1. Объект исследования

В работе изучаются особенности взаимодействия контуров вегетативной регуляции частоты сердечных сокращений (КРЧСС) и тонуса артериальных сосудов (КРТАС), регулирующего среднее артериальное давление. Известно, что оба рассматриваемых регуляторных контура име-

ют близкие частоты колебаний, составляющие порядка 0.1 Гц [12]. Согласно известным модельным представлениям об устройстве систем регуляции ССС и результатам их экспериментальных исследований изучаемые контуры могут рассматриваться как две взаимодействующие автоколебательные системы [8, 13–17] (рис. 1).

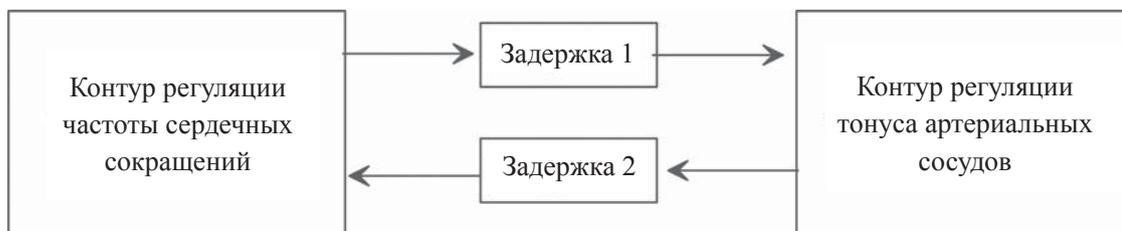


Рис. 1. Структурная схема объекта исследования. Изучается характер связи между двумя контурами регуляции деятельности ССС, имеющих собственные частоты колебаний около 0.1 Гц

Однако характер связи между этими системами, в частности ее сила, преимущественное направление, наличие в связи существенных временных задержек остаются открытым вопросом и являются предметом данного исследования.

В работе анализировались 8 записей субъектов (25–30 лет) без признаков сердечно-сосудистой патологии. Испытуемым одновременно регистрировались каналы электрокардиограммы (ЭКГ) во II стандартном отведении по Эйнтховену и пальцевая фотоплетизмограмма (ФПГ – сигнал кровенаполнения сосудов) отраженного света (ИК-диапазон, длина волны около 960 нм) (рис. 2). ФПГ регистрировалась

с дистальной фаланги среднего пальца левой руки. Регистрация сигналов осуществлялась в лежачем положении тела в течение 2 часов. Регистрация ЭКГ, ФПГ и дыхания осуществлялась при помощи многоканального электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03» модель 10 (НПКФ «Медиком-МТД», Россия) с комплектом стандартных датчиков. Регистрация сигналов производилась с частотой 250 Гц при разрядности квантования 14 бит.

После записи из ЭКГ выделялся сигнал кардиоинтервалограммы (КИГ – последовательность интервалов между R-пиками ЭКГ), которая

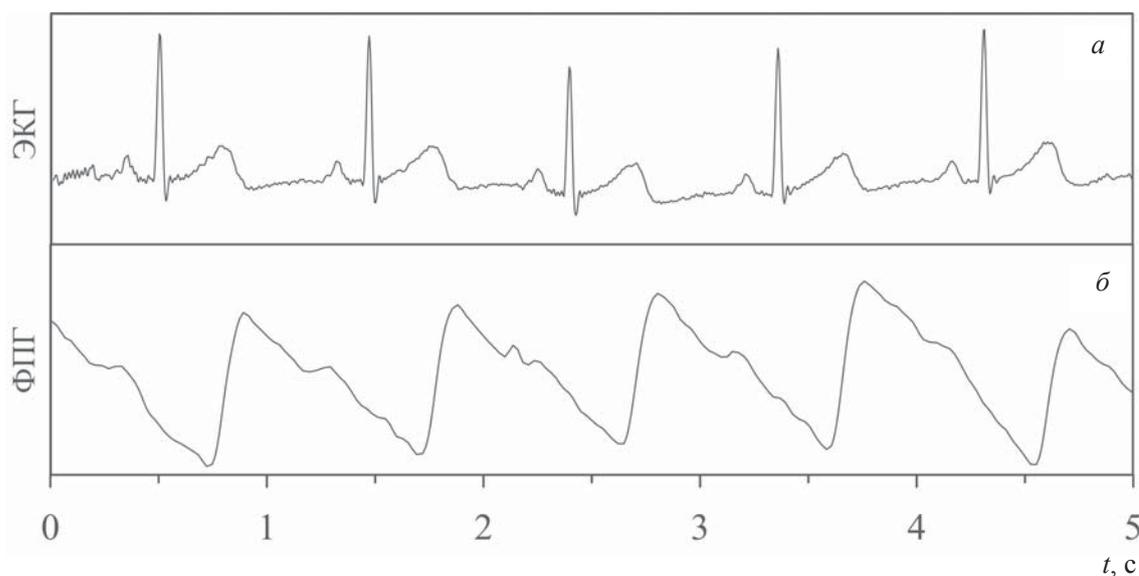


Рис. 2. Участки зарегистрированных временных рядов: а – ЭКГ, б – ФПГ



с помощью сплайн-интерполяции приводилась к эквидистантному виду с частотой дискретизации 5 выборок в секунду [18].

Для выделения из зарегистрированных временных рядов сигналов КРЧСС и КРТАС эквидистантная КИГ и ФПГ фильтровались полосовым фильтром в полосе 0.05–0.15 Гц. В результате фильтрации были выделены составляющие этих сигналов, имеющие частоты около 0.1 Гц и связанные с активностью двух исследуемых регуляторных контуров [16].

## 2. Метод оценки уровня взаимодействия между системами

Для анализа связанности исследуемых контуров регуляции использовался метод, основанный на моделировании фазовой динамики, который отличается хорошей чувствительностью в условиях слабой связи [17–20].

Суть метода заключается в попытке предсказания будущих значений мгновенной фазы одной системы, используя текущие значения мгновенной фазы второй системы. Если использование информации о фазе второй системы помогает предсказать динамику фазы первой системы (уменьшает ошибку прогноза), то делается вывод о воздействии второй системы на первую.

$$\begin{aligned} F_1(\varphi_1, \varphi_2, \mathbf{a}_1) &= \alpha_0^{(1)} + \sum_{m,n} \left( \alpha_{m,n}^{(1)} \cos(m\varphi_1 - n\varphi_2) + \beta_{m,n}^{(1)} \sin(m\varphi_1 - n\varphi_2) \right), \\ F_2(\varphi_2, \varphi_1, \mathbf{a}_2) &= \alpha_0^{(2)} + \sum_{m,n} \left( \alpha_{m,n}^{(2)} \cos(m\varphi_2 - n\varphi_1) + \beta_{m,n}^{(2)} \sin(m\varphi_2 - n\varphi_1) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{a}_k \equiv (\alpha_0^{(k)}, \{\alpha_{m,n}^{(k)}\}, \{\beta_{m,n}^{(k)}\})$  – векторы коэффициентов,  $k = 1, 2$ . Диапазон суммирования, т.е. набор значений индексов  $m$  и  $n$ , определяющих, какие слагаемые присутствуют в многочлене, может быть свой для каждого осциллятора [24]. Оценки силы воздействия  $G_{1,2}(\Delta)$ , где  $\Delta$  – временной сдвиг между колебаниями систем, рассчитываются из (1), (2) следующим образом:

$$G_{1,2} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \left( \frac{\partial F(\varphi_{1,2}(t), \varphi_{2,1}(t - \Delta), \mathbf{a}_{1,2})}{\partial \varphi_{1,2}} \right)^2 d\varphi_1 d\varphi_2. \quad (5)$$

В работе использовались следующие параметры метода:  $n = m = 1$ , поскольку сигналы фильтровались в одной полосе частот,  $\tau = 1$  для минимизации смещения, характерного для более высоких значений [25].

Оценка коэффициентов  $G_{1,2}(\Delta)$  сопровождалась расчетом доверительного интервала

На первом этапе анализа из анализируемых сигналов  $x_{1,2}(t)$  выделяются временные реализации их мгновенных фаз. В данной работе мы используем для этого широко распространенный подход, основанный на преобразовании Гильберта [21, 22]:

$$\varphi_{1,2}(t) = \arctg \frac{x_{1,2}^*(t)}{x_{1,2}(t)}, \quad (1)$$

где  $x_{1,2}^*(t)$  – преобразования Гильберта исходных сигналов  $x_{1,2}(t)$ , представляющее собой идеальный широкополосный фазовращатель на  $-\pi/2$  [23]:

$$x^*(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(t - \tau)} d\tau. \quad (2)$$

По временным рядам мгновенных фаз сигналов исследуемых систем строились предсказательные модели вида

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_1(t) &= F_1(\varphi_1(t), \varphi_2(t) + \varepsilon_1(t)), \\ \Delta\varphi_2(t) &= F_2(\varphi_2(t), \varphi_1(t) + \varepsilon_2(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi_k(t) = \varphi_k(t + \tau) - \varphi_k(t)$ ,  $k = 1, 2$  – приращения мгновенных фаз сигналов на  $\tau$  (интервале прогнозирования),  $\varepsilon_k(t)$  – шумы с нулевым средним,  $F_k$  – тригонометрические многочлены вида

с помощью аналитической формулы, предложенной в работе [26]. В предположении слабой связи, когда разности между наблюдаемыми значениями и значениями, предсказанными моделью, представляют собой независимые гауссовские случайные процессы, между исследуемыми системами формула дает 95%-ный доверительный интервал, применимый даже для случая коротких и зашумленных временных реализаций.

Превышение нуля значением  $G_{1,2}(\Delta)$  со своим доверительным интервалом, рассчитанным для каждого значения запаздывания  $\Delta$  в связи, интерпретируется как наличие статистически значимого воздействия.

Появление в  $G_{1,2}(\Delta)$  локальных максимумов для некоторых значений  $\Delta$  указывает на наличие задержки  $\Delta$  при распространении сигналов между системами [25].



### 3. Результаты обработки ЭКГ и ФПГ здоровых людей

Сигналы здоровых субъектов длительно-стью по 120 минут анализировались в скользящих окнах длиной 20 минут (около 120 характерных периодов колебаний исследуемых систем) со смещением окна 10 минут. В каждом окне рассчитывались значения индексов

$G_{1,2}(\Delta)$ . Значение  $\Delta$  перебиралось в диапазоне 0–10 с. Результаты анализа связанности в таких окнах для испытуемого № 8 представлены на рис. 3. Здесь и далее нижний индекс 1 соответствует направлению воздействия КРЧСС на КРТАС, а нижний индекс 2 – направлению воздействия КРТАС на КРЧСС.

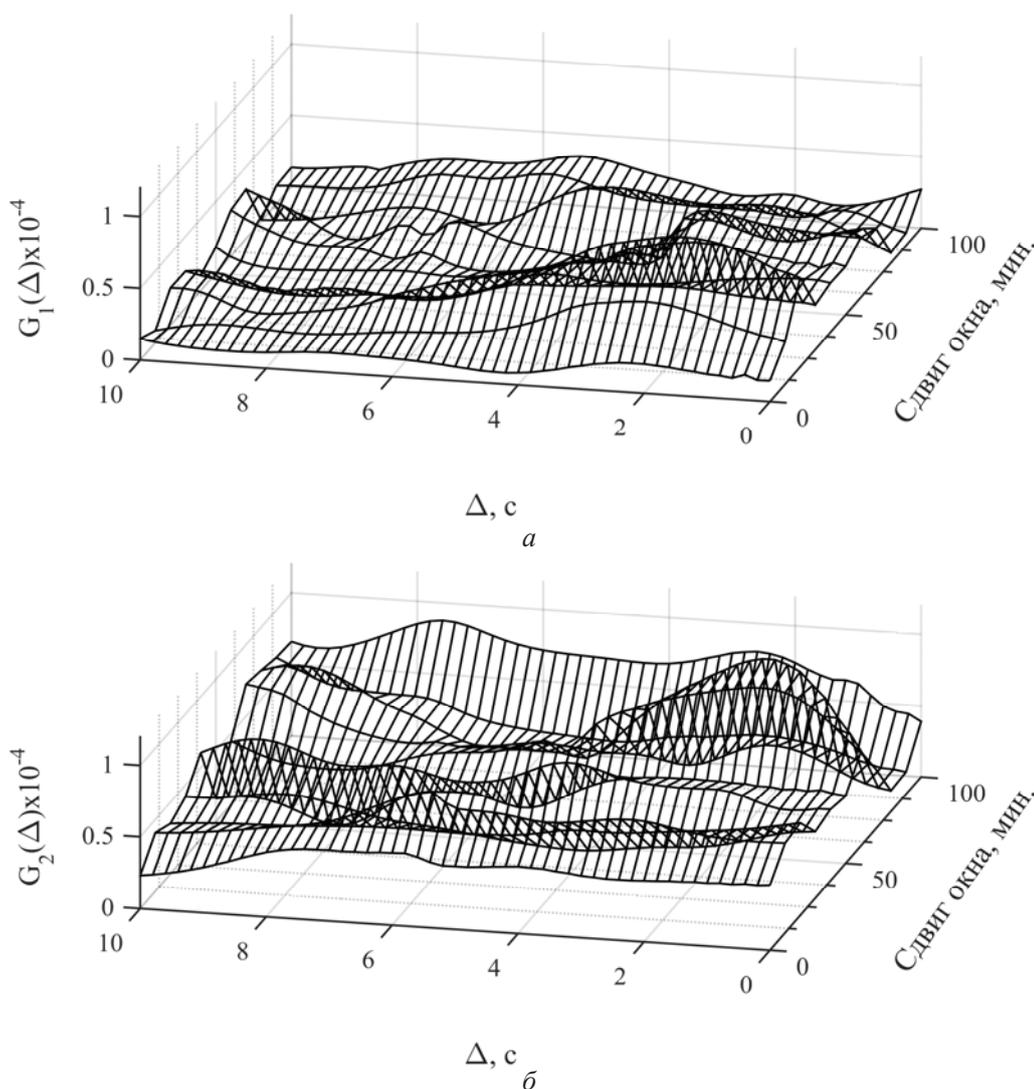


Рис. 3. Результаты анализа связанности в двадцатиминутных окнах с 50%-ным перекрытием для испытуемого № 8:  $a - G_1(\Delta, t_i)$ ,  $b - G_2(\Delta, t_i)$ .  $t_i$  – сдвиг окна

Рассчитанные зависимости  $G_{1,2}(\Delta)$  статистически значимо превышают 0 и, как правило, демонстрируют по несколько локальных максимумов, которые могут быть связаны как с задержками в связи, так и с флуктуациями, обусловленными влиянием шумов, артефактов и помех различной природы. Для уменьшения влияния таких флуктуаций результаты анализа

данных в окнах усреднялись по каждому из испытуемых. На рис. 4 представлены результаты усреднения рассчитанных в окнах зависимостей  $G_{1,2}(\Delta)$  для испытуемого № 8.

Абсолютные значения коэффициентов  $G_{1,2}$ , характеризующих степень воздействия исследуемых систем друг на друга в смысле анализа динамики фаз, оказываются близки друг к

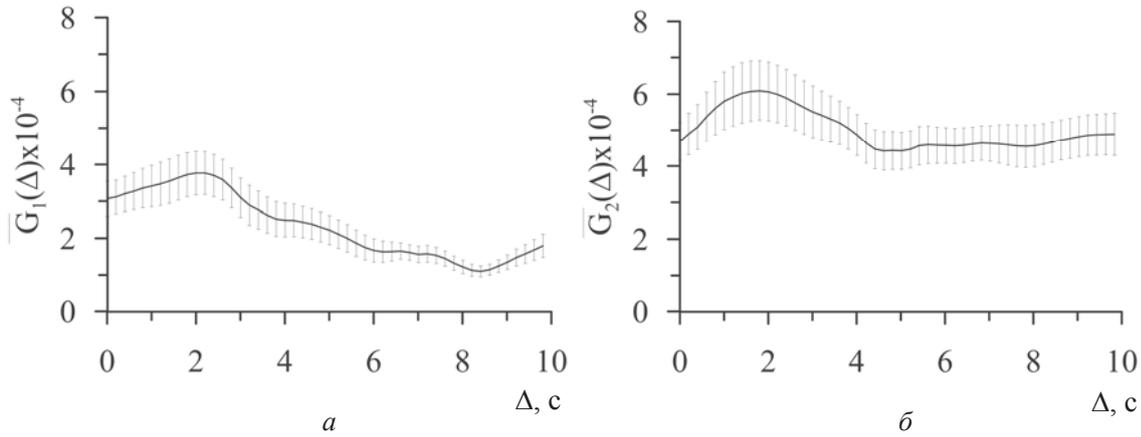


Рис. 4. Усреднённые по 11 окнам зависимости  $\bar{G}_{1,2}(\Delta)$  испытуемого № 8 с отложенными ошибками оценки среднего:  $a - \bar{G}_1(\Delta)$ ,  $b - \bar{G}_2(\Delta)$

другу, что может свидетельствовать о наличии симметричной двунаправленной связи между исследуемыми системами.

Усредненные зависимости  $\bar{G}_{1,2}(\Delta)$  демонстрируют для всех испытуемых 1-2 локальных максимума на лагах (временах запаздывания) порядка единиц секунд. Для анализа таких задержек лаги, соответствующие положениям двух локальных максимумов, были усреднены

по окнам для каждого испытуемого. Для такого усреднения выбирались лаги локальных максимумов  $G_{1,2}(\Delta)$ , соответствующие максимальным значениям индексов  $G_{1,2}(\Delta)$ . Рассматривались значения  $\Delta$ , не превышающие 5 секунд (половины характерного периода колебаний). Результаты расчёта, произведённого с помощью вышеописанной методики, представлены на рис. 5.

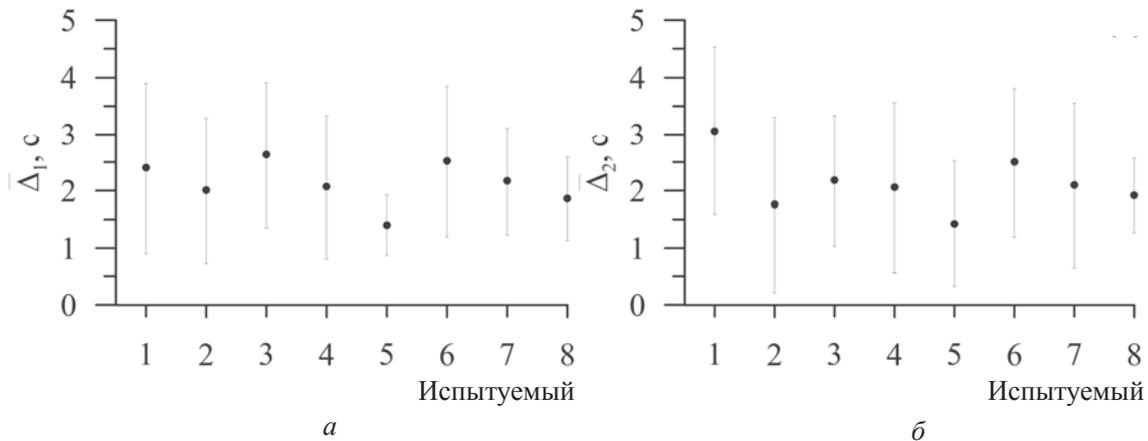


Рис. 5. Средние лаги, соответствующие положениям локальных максимумов зависимостей  $G_{1,2}(\Delta)$ :  $a - \bar{\Delta}_1$ ,  $b - \bar{\Delta}_2$ . Для каждой точки отложено стандартное отклонение

Средние значения лагов при анализе воздействия КРЧСС на КРТАС составляют  $2.13 \pm 0.14$  с, для воздействия КРТАС на КРЧСС –  $2.12 \pm 0.17$  с (представлены средние значения и стандартные ошибки). Из рисунка видно, что средние значения для различных испытуемых расположены плотной группой, причём значения средних лагов одного пациента для различных направлений воздействия близки между собой.

#### 4. Обсуждение полученных результатов

Методы диагностики связанности, основанные на анализе фазовой динамики, отличаются высокой чувствительностью при анализе слабых связей, однако требуют для анализа достаточно длинных временных реализаций. Анализ коротких (менее 100 характерных периодов) временных реализаций приводит к сильной флуктуации оценок силы и запаздывания в связи и смещению



ям таких оценок [27]. Поэтому интерпретация результатов анализа сигналов сложных живых систем требует особенной аккуратности, так как для таких систем характерно изменение их параметров во времени, сигналы зашумлены и, как правило, подвержены артефактам. Кроме того, получение экспериментальных реализаций достаточной длины часто затруднительно или невозможно по техническим и этическим причинам.

В ходе проведенного в данной работе исследования были проанализированы длительные записи здоровых субъектов (более 700 характерных периодов колебаний для каждого субъекта против 60 в работах [28–30]). Это позволило значительно уменьшить флуктуации оценок величины рассчитываемых индексов  $G_{1,2}(\Delta)$  по сравнению с ранними работами. Полученные оценки абсолютных значений  $G_{1,2}(\Delta)$  и величин запаздывания в связи в обе стороны оказались близкими друг к другу, что свидетельствует в пользу наличия двунаправленной связи с временным запаздыванием.

Полученные результаты представляют фундаментальный интерес, давая важную информацию об особенностях организации взаимодействия между контурами регуляции деятельности ССС. Эти результаты могут использоваться, в частности, для совершенствования математических моделей ССС, развиваемых в работах [31, 32]. Полученные времена запаздывания в связи (порядка 2 секунд) соотносятся по порядку величины с характерными для изучаемых регуляторных контуров временами задержек, оцененных в экспериментальной работе [33] и используемых при моделировании ССС [32] (порядка 2–3 секунд).

В данной работе сделаны шаги в направлении развития и совершенствования методики диагностики по неинвазивным записям характеристик связи изучаемых регуляторных контуров. Развитие данного направления исследований в перспективе может привести к разработке диагностической методики, позволяющей выявить изменения в особенностях взаимодействия регуляторных систем, обусловленных патологическими факторами.

### Заключение

В работе в ходе анализа двухчасовых записей здоровых субъектов было проведено исследование связанности контуров регуляции частоты сердечных сокращений и тонуса артериальных

сосудов, имеющих собственные частоты около 0.1 Гц. Анализ проводился с помощью метода моделирования фазовой динамики.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии между исследуемыми системами двунаправленной связи, имеющей временное запаздывание около 2 секунд. Такие особенности организации взаимодействия между исследуемыми системами выявлены впервые.

*Работа В. С. Хорева, А. С. Караваева, В. И. Пономаренко выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-02-03061), работа А. Р. Киселева, В. А. Шварца выполнена при поддержке гранта Президента РФ (№ МК-5361.2016.7).*

### Список литературы

1. Гайтон А. К., Холл Д. Э. Медицинская физиология. М. : Логосфера, 2008. 1296 с.
2. Вегетативные расстройства : клиника, диагностика, лечение / под ред. А. М. Вейна. М. : МИА, 1998. 752 с.
3. Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Bezruchko B. P. Synchronization of low-frequency oscillations in the cardiovascular system: Application to medical diagnostics and treatment // The European Physical Journal Special Topics. 2013. Vol. 222. P. 2687–2696. DOI: 10.1140/epjst/e2013-02048-1.
4. Karavaev A. S., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Ruban E. I., Bezruchko B. P. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system // CHAOS. 2009. Vol. 19. P. 033112. DOI:10.1063/1.3187794.
5. Киселев А. Р., Гриднев В. И., Караваев А. С., Посненкова О. М., Шварц В. А., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П. Коррекция вегетативной дисфункции сердечно-сосудистой системы у больных артериальной гипертонией на основе комбинированной терапии ателололом и амлодипином // Рос. кардиол. журн. 2012. № 6. С. 66–71.
6. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Evaluation of 5-year risk of cardiovascular events in patients after acute myocardial infarction using synchronization of 0.1-Hz rhythms in cardiovascular system // Annals of Noninvasive Electrocardiology. 2012. Vol. 17, № 3. P. 204–213. DOI: 10.1111/j.1542-474X.2012.00514.x.
7. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P. Selection of optimal dose of beta-blocker treatment in myocardial infarction patients basing on changes in synchronization between 0.1 Hz oscillations



- in heart rate and peripheral microcirculation // *J. Cardiovasc. Med.* 2012. Vol. 13, № 8. P. 491–498.
8. *Karavaev A. S., Ishbulatov J. M., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Gridnev V. I., Bezruchko B. P., Kiselev A. R.* Model of human cardiovascular system with a loop of autonomic regulation of the mean arterial pressure // *J. Amer. Soc. Hypertens.* 2016. Vol. 10, iss. 3. P. 235–243. DOI: 10.1016/j.jash.2015.12.014.
  9. *Julien C.* The enigma of Mayer waves : Facts and models // *Cardiovasc. Res.* 2006. Vol. 70. P. 12–21. DOI: 10.1016/j.cardiores.2005.11.008.
  10. *Keener J., Sneyd J.* *Mathematical Physiology II : Systems Physiology.* Springer, 2009. 580 p.
  11. *Cohen M. A., Taylor J. A.* Short-term cardiovascular oscillations in man : measuring and modelling the physiologies (Topical Review) // *J. Physiol.* 2002. Vol. 542.3. P. 669–683.
  12. *Bernardi L., Leuzzi S., Radaelli A., Passino C., Johnston J. A., Sleight P.* Low-frequency spontaneous fluctuations of R-R interval and blood pressure in conscious humans: a baroreceptor or central phenomenon? // *Clin. Sci.* 1994. Vol. 87. P. 649–654.
  13. *Cooley R. L., Montano N., Cogliati C., van de Borne P., Richenbacher W., Oren R., Somers V. K.* Evidence for a Central Origin of the Low-Frequency Oscillation in RR-Interval Variability // *Circulation.* 1998. Vol. 98. P. 556–561.
  14. *Ringwood J. V., Malpas S. C.* Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model // *Amer. J. Physiol.-Regul., Integr. Comp. Physiol.* 2001. Vol. 280. P. 1105.
  15. *Ишбулатов Ю. М., Караваев А. С., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Безручко Б. П.* Модель системы автономной регуляции сердечно-сосудистой системы с контуром барорефлекторного контроля среднего артериального давления в виде автогенератора с запаздыванием // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика.* 2015. Т. 15, вып. 2. С. 32–38.
  16. *Milek M.* Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. *Circulation.* 1996. Vol. 93. P. 1043–1065.
  17. *Караваев А. С., Киселев А. Р., Гриднев В. И., Боровкова Е. И., Прохоров М. Д., Посненкова О. М., Пономаренко В. И., Безручко Б. П., Шварц В. А.* Фазовый и частотный захват 0.1 Гц-колебаний в ритме сердца и барорефлекторной регуляции артериального давления дыханием с линейно меняющейся частотой у здоровых лиц // *Физиология человека.* 2013. Т. 39, № 4. С. 93–104.
  18. *Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В., Гаврилушкин А. П., Довгалецкий П. Я., Кукушкин Ю. А., Миронова Т. Ф., Прилуцкий Д. А., Семенов А. В., Федоров В. Ф., Флейшман А. Н., Медведев М. М.* Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // *Вестн. аритмологии.* 2001. Т. 24. С. 65–87.
  19. *Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М. : Техносфера. 2003. 496 с.
  20. *Schreiber T., Schmitz A.* Surrogate time series // *Physica D.* 2000. Vol. 142. P. 346–382.
  21. *Kiselev A. R., Karavaev A. S., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Ishbulatov Y. M., Posnenkova O. M., Bezruchko B. P.* Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability // *Russian Open Medical Journal.* 2016. Vol. 5, iss. 1. e0101. DOI:10.15275/rusomj.2016.0101.
  22. *Киселев А. Р., Караваев А. С., Гриднев В. И., Прохоров М. Д., Пономаренко В. И., Боровкова Е. И., Посненкова О. М., Шварц В. А., Безручко Б. П.* Метод оценки степени синхронизации низкочастотных колебаний в вариабельности ритма сердца и фотоплетизмограмме // *Кардио-ИТ.* 2016. Т. 3, вып. 1. С. 1–5. DOI: 10.15275/cardioit.2016.0101.
  23. *Айфичер Э. С., Джервис Б. У.* Цифровая обработка сигналов. М. : Вильямс, 2008. 992 с.
  24. *Rosenblum M. G., Pikovsky A. S.* Detecting direction of coupling in interacting oscillators // *Phys. Rev. E.* 2001. Vol. 64. P. 045202.
  25. *Смирнов Д. А., Карпеев И. А., Безручко Б. П.* Выявление связи между осцилляторами по коротким временным рядам : условие применимости метода моделирования фазовой динамики // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33, вып. 4. С. 19–26.
  26. *Smirnov D. A., Sidak E. V., Bezruchko B. P.* A Method for Revealing Coupling between Oscillators with Analytical Assessment of Statistical Significance // *Tech. Phys. Lett.* 2013. Vol. 39, № 7. P. 601–605. DOI:10.1134/S1063785013070110.
  27. *Смирнов Д. А.* Диагностика слабой связанности между автоколебательными системами по коротким временным рядам: метод и приложения // *Радиотехника и электроника.* 2006. Т. 51, № 5. С. 1–11.
  28. *Smirnov D. A., Sidak E. V., Bezruchko B. P.* Detection of coupling between oscillators with analytic tests for significance // *Eur. Phys. J. Special Topics.* 2013. Vol. 222. P. 2441–2451.
  29. *Киселев А. Р., Хорев В. С., Гриднев В. И., Прохоров М. Д., Караваев А. С., Посненкова О. М., Пономаренко В. И., Безручко Б. П., Шварц В. А.* Взаимодействие 0.1 Гц-колебаний в вариабельности ритма сердца и вариабельности кровенаполнения дистального сосудистого русла // *Физиология человека.* 2012. Т. 38, № 3. С. 92–99.
  30. *Хорев В. С., Кульминский Д. Д., Миронов С. А.* Оценка запаздывания и связи между 0,1 Гц ритмами регуляции в сердечно-сосудистой системе // *Бюл. мед. интернет-конференций.* 2014. Т. 4, № 7. С. 958–961.
  31. *Karavaev A. S., Ishbulatov J. M., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Gridnev V. I., Bezruchko B. P., Kise-*



- lev A. R. Model of human cardiovascular system with a loop of autonomic regulation of the mean arterial pressure // *J. Amer. Soc. Hypertension*. 2016. Vol. 10, iss. 3. P. 235–243. DOI:10.1016/j.jash.2015.12.014.
32. Kotani K., Struzik Z. R., Takamasu K., Stanley H. E., Yamamoto Y. Model for Complex Heart Rate Dynamics in Health and Disease // *Phys. Rev. E*. 2005. Vol. 72. P. 041904.
33. Ringwood J. V., Malpas S. C. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model // *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2001. Vol. 280, № 4. P. R1105–R1115. DOI: 10.1152/ajpregu.00489.2001.

#### Образец для цитирования:

Хорев В. С., Киселев А. Р., Шварц В. А., Ланшьева Е. Е., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Гриднев В. И., Караваяев А. С. Исследование запаздывания в связи между контурами регуляции сердечно-сосудистой системы у здорового человека методом моделирования фазовой динамики // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 227–237. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-227-237.

#### Investigation of Delay Time in Interaction between the Regulatory Circuits in the Cardiovascular System of Healthy Humans Using Modeling of Phase Dynamics

V. S. Khorev<sup>1</sup>, A. R. Kiselev<sup>2</sup>, V. A. Shvartz<sup>3</sup>, E. E. Lapsheva<sup>4</sup>, V. I. Ponomarenko<sup>5</sup>, M. D. Prokhorov<sup>6</sup>, V. I. Gridnev<sup>7</sup>, A. S. Karavaev<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Vladimir S. Khorev, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, khorevvs@gmail.com

<sup>2</sup>Anton R. Kiselev, Research Institute of Cardiology, Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 141, Chernyshevskogo str., Saratov, 410028, Russia, antonkis@list.ru

<sup>3</sup>Vladimir A. Shvartz, A. N. Bakulev Scientific Center for Cardiovascular Surgery, 8, Leninsky prospekt, Moscow, 117931, Russia, vashvarts@bakulev.ru

<sup>4</sup>Elena E. Lapsheva, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, lapsheva@yandex.ru

<sup>5</sup>Vladimir I. Ponomarenko, Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38, Zelenaja str., Saratov, 410019, Russia, ponomarenkovi@gmail.com

<sup>6</sup>Mikhail D. Prokhorov, Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38, Zelenaja str., Saratov, 410019, Russia, mdprokhorov@yandex.ru

<sup>7</sup>Vladimir I. Gridnev, Research Institute of Cardiology, Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 141, Chernyshevskogo str., Saratov, 410028, Russia, gridnev@cardio-it.ru

<sup>8</sup>Anatoly S. Karavaev, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, karavaevas@gmail.com

**Background and Objectives:** Low-frequency oscillations with a basic frequency of about 0.1 Hz are observed in the human heart rate and peripheral microcirculation. It is found out that these processes are self-oscillatory and interact between themselves. However, the details and characteristics of this interaction including the direction of coupling and delays in coupling functions are not well studied yet. Thus, the estimation of delay times in the coupling between the low-frequency rhythms of cardiovascular system is an important task for revealing the physiological mechanisms of the cardiovascular regulation. **Materials and Methods:** The method

of coupling detection based on constructing the models of instantaneous phase dynamics is applied for the estimation of delay time in the interaction between the cardiovascular regulatory systems from their experimental time series. The signals of electrocardiogram and photoplethysmogram were recorded using the device EEGA-21/26 Entsefalan-131-03 (Medikom-MTD, Russia) with a set of standard sensors. The signals were recorded with a frequency of 250 Hz and a resolution of 12 bit. **Results:** The estimated value of delay time in the interaction between the systems of regulation of cardiovascular low-frequency oscillations is  $2.13 \pm 0.14$  s for the direction «heart – peripheral microcirculation» and  $2.12 \pm 0.17$  s for the direction «peripheral microcirculation – heart». **Conclusion:** The analysis of two-hour experimental time series of healthy subjects revealed that the regulatory systems of low-frequency oscillations in heart rate and peripheral microcirculation demonstrate bidirectional interaction with delay times of about several seconds.

**Key words:** phase dynamics, coupling detection, time delay, regulatory circuits, cardiovascular system, cardiovascular regulation.

#### References

- Guyton A. C., Hall J. E. *Medicinskaja fiziologija* [Textbook of medical physiology]. Moscow, Logosfera, 2008. 1296 p. (in Russian).
- Vegetativnye rasstroistva: klinika, diagnostika, lechenie* [Autonomic dysfunction: clinical features, treatment, diagnosis]. Ed. A. M. Wein. Moscow, Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo, 2000. 752 p. (in Russian).
- Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Bezruchko B. P. Synchronization of low-frequency oscillations in the cardiovascular system: Application to medical diagnostics and treatment. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, vol. 222, pp. 2687–2696. DOI: 10.1140/epjst/e2013-02048-1.
- Karavaev A. S., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Ruban E. I., Bezruchko B. P. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system. *CHAOS*, 2009, vol. 19, pp. 033112. DOI:10.1063/1.3187794.
- Kiselev A. R., Gridnev V. I., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Shvartz V. A., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Gridnev V. I., Karavaev A. S., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Ruban E. I., Bezruchko B. P. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system. *CHAOS*, 2009, vol. 19, pp. 033112. DOI:10.1063/1.3187794.



- rov M. D., Bezruchko B. P. Combination therapy with atenolol and amlodipine and correction of cardiovascular autonomic dysfunction in patients with arterial hypertension. *Russian Journal of Cardiology*, 2012, no. 6, pp. 66–71 (in Russian). DOI: 10.1111/j.1542-474X.2012.00514.x.
6. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Evaluation of 5-year risk of cardiovascular events in patients after acute myocardial infarction using synchronization of 0.1-Hz rhythms in cardiovascular system. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 2012, vol. 17, no. 3, pp. 204–213.
  7. Kiselev A. R., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P. Selection of optimal dose of beta-blocker treatment in myocardial infarction patients basing on changes in synchronization between 0.1 Hz oscillations in heart rate and peripheral microcirculation. *Journal of Cardiovascular Medicine*, 2012, vol. 13, no. 8, pp. 491–498.
  8. Karavaev A. S., Ishbulatov J. M., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Gridnev V. I., Bezruchko B. P., Kiselev A. R. Model of human cardiovascular system with a loop of autonomic regulation of the mean arterial pressure. *Journal of the American Society of Hypertension*, 2016, vol. 10, iss. 3, pp. 235–243. DOI: 10.1016/j.jash.2015.12.014.
  9. Julien C. The enigma of Mayer waves: Facts and models. *Cardiovascular Research*, 2006, vol. 70, pp. 12–21. DOI: 10.1016/j.cardiores.2005.11.008.
  10. Keener J., Sneyd J. *Mathematical Physiology II: Systems Physiology*. New York, Springer, 2009. 580 p.
  11. Cohen M. A., Taylor J. A. Short-term cardiovascular oscillations in man: measuring and modelling the physiologies (Topical Review). *Journal of Physiology*, 2002, vol. 542, pt. 3, pp. 669–683.
  12. Bernardi L., Leuzzi S., Radaelli A., Passino C., Johnston J. A., Sleight P. Low-frequency spontaneous fluctuations of R-R interval and blood pressure in conscious humans: a baroreceptor or central phenomenon? *Clinical Science*, 1994, vol. 87, pp. 649–654.
  13. Cooley R. L., Montano N., Cogliati C., van de Borne P., Richenbacher W., Oren R., Somers V. K. Evidence for a Central Origin of the Low-Frequency Oscillation in RR-Interval Variability. *Circulation*, 1998, vol. 98, pp. 556–561.
  14. Ringwood J. V., Malpas S. C. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2001, vol. 280, pp. 1105.
  15. Ishbulatov Y. M., Karavaev A. S., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Bezruchko B. P. Model of Cardiovascular System Autonomic Regulation with a Circuit of Baroreflexory Control of Mean Arterial Pressure in the Form of Delayed-Feedback Oscillator. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2015, vol. 15, iss. 2, pp. 32–38.
  16. Milek M. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. *Circulation*, 1996, vol. 93, pp. 1043–1065.
  17. Karavaev A. S., Kiselev A. R., Gridnev V. I., Borovkova E. I., Prokhorov M. D., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Phase and frequency locking of 0.1-Hz oscillations in heart rate and baroreflex control of blood pressure by breathing of linearly varying frequency as determined in healthy subjects. *Human Physiology*, 2013, vol. 39, no. 4, pp. 416–25. DOI: 10.1134/S0362119713010040.
  18. Baevskiy R. M., Ivanov G. G., Chireykin L. V., Gavrilushkin A. P., Dovgalevskiy P. Ya., Kukushkin Yu. A., Mironova T. F., Prilutskiy D. A., Semenov Yu. N., Fedorov V. F., Fleyshman A. N., Medvedev M. M. Analysis of heart rate variability by use of different electrocardiographic systems. *Viesnik aritmologii [Arrhythmology Digest]*, 2001, vol. 24, pp. 65–86 (in Russian).
  19. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. *Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 496 p.
  20. Schreiber T., Schmitz A. Surrogate time series. *Physica D*, 2000, vol. 142, pp. 346–382.
  21. Kiselev A. R., Karavaev A. S., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Ishbulatov Y. M., Posnenkova O. M., Bezruchko B. P. Method of estimation of synchronization strength between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmographic waveform variability. *Russian Open Medical Journal*, 2016, vol. 5, iss. 1, e0101. DOI: 10.15275/rusomj.2016.0101.
  22. Kiselev A. R., Karavaev A. S., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Posnenkova O. M., Bezruchko B. P. Method of assessment of synchronization between low-frequency oscillations in heart rate variability and photoplethysmogram. *Cardio-IT*, 2016, vol. 3, iss. 1, pp. 1–5. DOI: 10.15275/cardioit.2016.0101 (in Russian).
  23. Ifeachor E. C., Jervis B. W. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. Harlow, Pearson Education, 2002. 992 p.
  24. Rosenblum M. G., Pikovsky A. S. Detecting direction of coupling in interacting oscillators. *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 64, pp. 045202.
  25. Smirnov D. A., Karpeev I. A., Bezruchko B. P. Detection of coupling between oscillators from their short time series: Condition of applicability of the method of phase dynamics modeling. *Technical Physics Letters*, 2007, vol. 33, no. 2, pp. 147–150.
  26. Smirnov D. A., Sidak E. V., Bezruchko B. P. A Method for Revealing Coupling between Oscillators with Analytical Assessment of Statistical Significance. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, no. 7, pp. 601–605. DOI: 10.1134/S1063785013070110.



27. Smirnov D. A. Characterization of Weak Coupling between Self-Oscillation Systems from Short Time Series: Technique and Applications. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2006, vol. 51, no. 5, pp. 534–544 (in Russian).
28. Smirnov D. A., Sidak E. V., Bezruchko B. P. Detection of coupling between oscillators with analytic tests for significance. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, vol. 222, pp. 2441–2451.
29. Kiselev A. R., Khorev V. S., Gridnev V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Posnenkova O. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Shvartz V. A. Interaction of 0.1-Hz oscillations in heart rate variability and distal blood flow variability. *Human Physiology*, 2012, vol. 38, no. 3, pp. 303–309. DOI: 10.1134/S0362119712020107.
30. Khorev V. S., Kulminsky D. D., Mironov S. A. Estimation of delay and interaction between 0.1 Hz regulatory rhythms in cardiovascular system. *Bulletin of Medical Internet Conferences*, 2014, vol. 4, no. 7, pp. 958–961 (in Russian).
31. Karavaev A. S., Ishbulatov J. M., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Gridnev V. I., Bezruchko B. P., Kiselev A. R. Model of human cardiovascular system with a loop of autonomic regulation of the mean arterial pressure. *Journal of the American Society of Hypertension*, 2016, vol. 10, iss. 3, pp. 235–243. DOI:10.1016/j.jash.2015.12.014.
32. Kotani K., Struzik Z. R., Takamasu K., Stanley H. E., Yamamoto Y. Model for Complex Heart Rate Dynamics in Health and Disease. *Physical Review E*, 2005, vol. 72, pp. 041904.
33. Ringwood J. V., Malpas S. C. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model. *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2001, vol. 280, no. 4, R. 1105–1115. DOI: 10.1152/ajpregu.00489.2001.

---

**Please cite this article in press as:**

Khorev V. S., Kiselev A. R., Shvartz V. A., Lapsheva E. E., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Gridnev V. I., Karavaev A. S. Investigation of Delay Time in Interaction between the Regulatory Circuits in the Cardiovascular System of Healthy Humans Using Modeling of Phase Dynamics. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 227–237. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-227-237.

---

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ

УДК 539.1.06

### ПОДГОТОВКА МЕДИЦИНСКИХ ФИЗИКОВ ДЛЯ КЛИНИЧЕСКИХ БАЗ В МОСКОВСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

А. П. Черняев<sup>1</sup>, У. А. Близнюк<sup>2</sup>, П. Ю. Борщеговская<sup>3</sup>,  
С. М. Варзарь<sup>4</sup>, В. В. Розанов<sup>5</sup>, Г. А. Крусанов<sup>6</sup>, А. А. Белянов<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Черняев Александр Петрович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины; заведующий лабораторией пучковых технологий и медицинской физики, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, a.p.chernyev@yandex.ru

<sup>2</sup>Близнюк Ульяна Александровна, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории пучковых технологий и медицинской физики, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, uabliznyuk@gmail.com

<sup>3</sup>Борщеговская Полина Юрьевна, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, alexeevapo@mail.ru

<sup>4</sup>Варзарь Сергей Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, varzar@physics.msu.ru

<sup>5</sup>Розанов Владимир Викторович, доктор биологических наук, профессор кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, vrozanov@mail.ru

<sup>6</sup>Крусанов Григорий Андреевич, аспирант кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, krusanov@physics.msu.ru

<sup>7</sup>Белянов Александр Александрович, младший научный сотрудник кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, belyanov@cern.ch

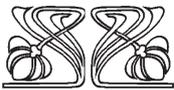
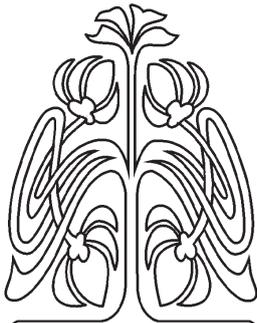
В статье обсуждается проблема подготовки специалистов в области медицинской физики для работы в клинических учреждениях на современном медицинском оборудовании для диагностики и лечения различных заболеваний, в том числе онкологических. Описывается опыт подготовки студентов и проведения курсов повышения квалификации в данной области на кафедре физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ). Обучение студентов проводится в рамках сотрудничества с факультетом фундаментальной медицины МГУ, НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ и компаниями-производителями высокотехнологического оборудования для лучевой терапии.

**Ключевые слова:** медицинская физика, ядерная медицина, лучевая терапия, обучение, курсы повышения квалификации.

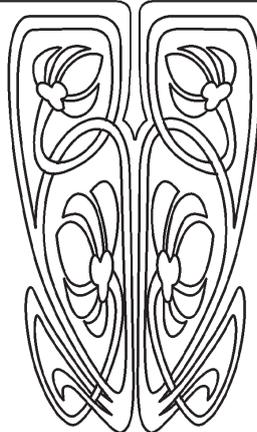
DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-238-243

Применение последних достижений ядерной и ускорительной физики в медицине является одним из эффективных направлений развития методов лечения и диагностики заболеваний. Особенно

© Черняев А. П., Близнюк У. А., Борщеговская П. Ю., Варзарь С. М., Розанов В. В., Крусанов Г. А., Белянов А. А., 2016



МЕТОДИЧЕСКИЙ  
ОТДЕЛ





заметна роль ядерно-физических технологий в области онкологии.

Сегодня медицина имеет в своем распоряжении достаточно большой арсенал физических технологий и оборудования для диагностики, профилактики и терапии заболеваний: широкий спектр ионизирующих излучений (рентгеновское, гамма-излучение, электроны, протоны, тяжелые ионы, нейтроны и т.д.); различная ускорительная техника, гамма-терапевтические аппараты, оборудование для радиохирургии, нейтронные генераторы, открытые и закрытые радионуклидные источники и т.д.; различные средства медицинской визуализации (ультразвуковое исследование, рентгенография, рентгеновская компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, однофотонная эмиссионная компьютерная томография, позитронная эмиссионная томография и др.); источники оптического излучения (например, лазеры), ультразвук, магнитные поля.

Несмотря на значительное переоснащение российских медицинских центров новейшими аппаратами в последние годы, количественные показатели, нормированные на число жителей страны, до сих пор значительно отличаются от показателей других стран. Так, в России один медицинский ускоритель приходится примерно на 1.5 млн жителей, а в США и в странах Европейского союза – на 80 тыс. и 100 тыс. человек соответственно. В мире лучевую терапию проходят 70% онкологических больных, а в России – около 30% больных, причем в большинстве случаев на кобальтовых источниках [1–3].

Проведенные оценки [4,5] показывают, что для достижения показателей, близких к европейским, в России необходимо иметь около 1000 ускорителей электронов и 30 ускорителей для протонной лучевой терапии, а также 4 центра ионной лучевой терапии. В диагностическом оборудовании на данный момент потребности примерно составляют: гамма-камеры – 300, компьютерные томографы – 140, позитронные эмиссионные томографы – 100, магнитно-резонансные томографы – 1400.

Одна из проблем, возникающая в клинике в данном направлении, связана с отсутствием специалистов, которые могут работать на поставляемом оборудовании. В первую очередь речь идет о медицинских физиках, которые отвечают за обеспечение требований точности при подведении требуемой дозы ионизирующего излучения к опухоли с минимальным поражением

соседних здоровых тканей, за гарантию качества и безопасность лучевого лечения.

Так, для эффективной работы по лучевому лечению пациентов необходимо слаженное взаимодействие врача и медицинского физика. Основные задачи в системе реализации лучевой терапии, за которые ответственны медицинские физики:

- измерения, связанные с оценкой дозы, подводимой к опухоли;
- уменьшение дозы общего облучения пациента без ущерба для диагностического процесса;
- тестирование оборудования для гарантии качества диагностического изображения или точности лечения;
- контроль радиационной защиты установок;
- дозиметрическое планирование облучения пациента.

Для успешной работы такого специалиста необходимы очень специфическая широкая и глубокая подготовка.

В настоящее время на 140 отделений лучевой терапии онкологических клиник России приходится около 300 штатных сотрудников, исполняющих обязанности медицинских физиков, хотя по европейским показателям стране необходимо 1500 квалифицированных медицинских физиков, т.е. в 5 раз больше [3, 4]. Проблемой является не только отсутствие соответствующих штатных единиц, но и квалификация специалистов, которые могут их занимать.

Понимание этого имеется и в медицинских, и в научно-образовательных кругах. Лидерами подготовки медицинских физиков в России являются физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ) и Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», где целевые учебные программы развиваются с 1990-х годов.

Медицинская проблематика присутствует в научной тематике многих кафедр физического факультета МГУ (рис. 1). Однако специальная подготовка студентов МГУ по медицинской физике осуществляется только на двух кафедрах: кафедре медицинской физики и кафедре физики ускорителей и радиационной медицины. Если использовать термин «медицинские физики» в отношении специалистов, работающих с ионизирующим излучением, то это кафедра физики ускорителей и радиационной медицины.



Рис. 1. Подготовка студентов на кафедрах физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в области медицинской физики

Образование медицинского физика складывается из трех составляющих: первое – это обучение базовым знаниям по физике, математике и другим естественно-научным и гуманитарным дисциплинам; второе – в программу обучения входят предметы медицинской, биологической и молекулярной физики, и третье – проведение научно-исследовательских практических занятий в лабораториях или лечебных учреждениях.

На кафедре физики ускорителей и радиационной медицины подготовка студентов начинается с третьего курса бакалавриата (четыре семестра) и продолжается до второго года обучения

в магистратуре (четыре семестра). В процессе обучения студенты осваивают теоретический материал, занимаются в специальном практикуме, выполняют научно-исследовательскую работу и на заключительном этапе бакалавриата, а затем магистратуры представляют дипломные проекты. Рабочие планы кафедры включают 28 оригинальных спецкурсов по дисциплинам специализации. Часть лабораторных заданий студенты выполняют на действующем клиническом оборудовании (рис. 2).

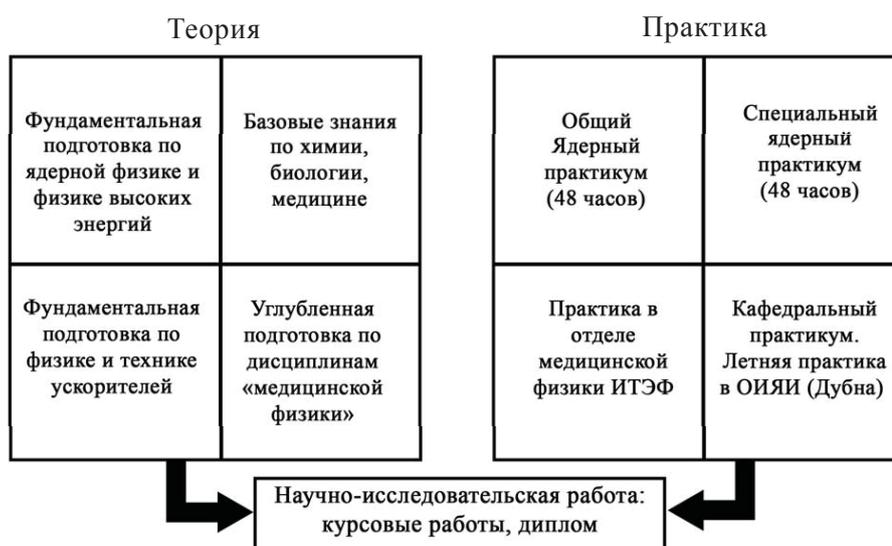


Рис. 2. Профессиональная подготовка студентов на кафедре физики ускорителей и радиационной медицины



Отличительной чертой учебного плана кафедры является летняя учебная практика по медицинской физике. Практика проводится в течение 14 дней в Дубне на базе Объединенного института ядерных исследований и филиала Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ. План практики составлен таким образом, чтобы за время ее прохождения студенты получили базовые знания по медицинской физике и были подготовлены к изучению на старших курсах более сложных дисциплин. Также в ходе практики у студентов есть уникальная возможность посетить научные лаборатории, реактор, циклотрон, синхрофазотрон и другие ускорители, работающие в Дубне. По итогам практики студенты сдают зачет в виде выполнения курсовой работы. Дипломные работы студенты кафедры выполняют в МГУ и исследовательских центрах Москвы и Московской области: физический факультет и факультет фундаментальной медицины Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ, Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова, Научно-исследовательский институт нейрохирургии имени Н. Н. Бурденко, Московский научно-исследовательский онкологический институт имени П. А. Герцена (МНИОИ), Российский онкологический научный центр имени Н. Н. Блохина, Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Объединённый институт ядерных исследований (Дубна), Институт физики высоких энергий (Протвино), Государственный научный центр «Институт биофизики», Российский научный центр рентгенодиагностики, Городская клиническая больница № 57, Московский областной онкологический диспансер, Клиника ОАО «Медицина», Научно-исследовательский институт общей реаниматологии, Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна и других.

Выпуск специалистов на кафедре физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ составил в 2005–2014 гг. 82 человека, из них 40 остались в специальности после обучения.

С 2012 г. МГУ совместно с МНИОИ им. П. А. Герцена при поддержке компаний «МСМ-Медимпэкс» и «EЛЕКТА» организует краткосрочные курсы повышения квалификации «Физика радиационной медицины». Основной целью курсов является повышение качества профессиональной подготовки специалистов,

которые обеспечивают в медицине физико-математическое или техническое сопровождение методов ядерной медицины, лучевой диагностики и терапии. Программа подготовки позволяет систематизировать теоретические знания студентов и совершенствовать базовые практические навыки, необходимые для работы на высокотехнологичном медицинском оборудовании.

Обучение осуществляется преподавателями Московского университета в сотрудничестве со специалистами МНИОИ имени П. А. Герцена, компании «МСМ-Медимпэкс» и компании «EЛЕКТА». Занятия проводятся на базе Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ и МНИОИ имени П. А. Герцена. Программа курсов включает лекции, семинары, практические занятия в учебных и научно-исследовательских лабораториях, практикум на системах лучевого планирования, практические занятия в клинических отделениях и лабораториях. Практикум в учебных и научно-исследовательских лабораториях МГУ направлен на закрепление теоретических знаний по разделам программы. Практические занятия по клинической дозиметрии и гарантии качества в клинических отделениях и лабораториях организованы в МНИОИ имени П. А. Герцена и направлены на освоение навыков практической работы на действующем высокотехнологичном медицинском оборудовании.

В основные тематические разделы программы курсов входят:

- организация радиотерапевтической помощи в РФ;
- основы организации физико-технического сопровождения лучевой терапии и ядерной медицины;
- физика взаимодействия излучений с веществом;
- радиационная безопасность при работе с источниками ионизирующего излучения;
- общие принципы и методы диагностики и лечения злокачественных опухолей;
- клиническая дозиметрия;
- медицинские ускорители и методы формирования радиотерапевтических пучков;
- гарантия качества в лучевой терапии;
- лучевое планирование.

По окончании курсов студентам выдается удостоверение государственного образца. С октября 2012 г. по программе прошли обучение 37 специалистов из 17 регионов России, а также Казахстана.

В 2013 г. благодаря совместному сотрудничеству кафедры физики ускорителей и радиационной медицины и компании «МСМ-Медимпэкс» в



ядерном практикуме были установлены системы планирования лучевого лечения онкологических заболеваний Хю, широко используемые в клиниках России и стран Европы. Для построения плана облучения необходима согласованная работа врача, очерчивающего интересующую область на томографических снимках пациента, и медицинского физика, планирующего ход облучения. Слушатели курсов повышения квалификации имеют возможность выполнять практические занятия на данных системах планирования. Также студенты кафедры физики ускорителей и радиационной медицины начиная со второго курса имеют возможность осуществлять практические занятия на этих системах, осваивать их для дальнейшей работы в ведущих медицинских центрах страны.

На протяжении более 15 лет кафедра физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ сотрудничает с факультетом фундаментальной медицины (ФММ) МГУ. Сотрудниками кафедры читается курс лекций по общей физике, проводятся семинарские занятия для студентов-медиков. В 2012 г. студенты первого курса ФММ имели возможность выполнить задачи атомного и ядерного практикумов. На кафедре физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета идет разработка совместного практикума для студентов физического факультета и факультета фундаментальной медицины. Предполагается смоделировать реальную ситуацию совместной работы врача и физика в клинике при создании плана облучения онкологического больного. Студенты медики и физики будут совместно осуществлять оконтуривание интересующего объема на различных срезах, полученных с помощью томографии, искать наилучшие направления облучения, варьировать энергию и количество фракций для достижения оптимального плана лечения.

В 2014 г. для обучения студентов Московскому государственному университету имени

М. В. Ломоносова фирмой «ELEKTA» и компанией «МСМ-Медимпэкс» предоставлен учебный ускоритель Elekta Synergy (линейный ускоритель электронов с максимальной энергией до 18 МэВ). Запуск ускорителя, оснащенного системами планирования, позволит создать первый в восточной Европе центр подготовки радиационных медицинских физиков.

Таким образом, благодаря сотрудничеству двух факультетов и НИИ ядерной физики МГУ, компаний-производителей медицинского оборудования в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова осуществляется подготовка высококвалифицированных специалистов для коллективов врачей и медицинских физиков, способных обеспечить эффективное лучевое лечение.

#### Список литературы

1. Barletta W., Chattopadhyay S., Seryi A. Educating and Training Accelerator Scientists and Technologists for Tomorrow // *Reviews of Accelerator Science and Technology*. 2012. Vol. 5. P. 313.
2. Карпунин В. О., Рязанцев О. Б., Хорошков В. С. Лучевая диагностика и терапия : развитие оборудования и технологий в мире и России // *Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии : материалы междунар. конф. : весенняя сессия / под ред. Е. Л. Глоризова (Гурзуф, 01–12 июня 2015 г.)*. М. : ООО «Институт новых информационных технологий», 2015. С. 167–179.
3. Клёнов Г. И., Козлов Ю. Ф., Хорошков В. С. Шестидесять лет протонной лучевой терапии : результаты, проблемы и тенденции // *Медицинская физика*. 2015. № 1 (65). С. 86–90.
4. Chernyaev A. P., Kolyvanovaa M. A., Borshchegovskaya P. Yu. Radiation technology in medicine. Part 1. Medicine accelerators // *Moscow University Physics Bull.* 2015. Vol. 70, iss. 6. P. 457–465.
5. Белоусов А. В., Близняк У. А., Варзарь С. М., Загоруйко М. В., Осипов А. С., Черняев А. П. Ускорители в медицине // *Медицинская физика*. 2014. № 1 (61). С. 113–120.

#### Образец для цитирования:

Черняев А. П., Близняк У. А., Борщеговская П. Ю., Варзарь С. М., Розанов В. В., Крусанов Г. А., Белянов А. А. Подготовка медицинских физиков для клинических баз в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 238–243. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-238-243.

#### Training of Medical Physicists for Clinical Bases in Lomonosov Moscow State University

A. P. Chernyaev<sup>1</sup>, U. A. Bliznyuk<sup>2</sup>,  
P. Yu. Borschegovskaya<sup>3</sup>, S. M. Varzar<sup>4</sup>,  
V. V. Rozanov<sup>5</sup>, G. A. Krusanov<sup>6</sup>, A. A. Belyanov<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Alexander P. Chernyaev, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, a.p.chernyaev@yandex.ru

<sup>2</sup>Ulyana A. Bliznyuk, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, uabliznyuk@gmail.com

<sup>3</sup>Polina Yu. Borschegovskaya, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, alexeevapo@mail.ru

<sup>4</sup>Sergey M. Varzar, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, varzar@physics.msu.ru



<sup>5</sup>Vladimir V. Rozanov, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, vrozanov@mail.ru

<sup>6</sup>Grigori A. Krusanov, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, krusanov@physics.msu.ru

<sup>7</sup>Aleksander A. Belianov, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, belyanov@cern.ch

In article the problem of training of experts in the field of medical physics to work in clinics using at the modern medical equipment for diagnostics and treatment of various diseases, including oncological has been discussed. The experience of training of students and conducting training courses on Department of Physics of Lomonosov Moscow State University has been given. Training of students in the framework of cooperation with Faculty of Fundamental Medicine of Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Moscow State University and manufacturers of high-tech equipment for radiation therapy has been conducted.

**Key words:** medical physics, nuclear medicine, radiation therapy, training, qualification hanging courses.

## References

1. Barletta W., Chattopadhyay S., Seryi A. Educating and Training Accelerator Scientists and Technologists for Tomorrow. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2012, vol. 5. P. 313.
2. Karpunin V. A., Ryazantsev O. B., Khoroshkov V. S. Luchevaia diagnostika i terapiia : razvitie oborudovaniia i tekhnologii v mire i Rossii [Radiation diagnostics and therapy: development of equipment and technologies in the world and Russia]. *Novye informatsionnye tekhnologii v meditsine, biologii, farmakologii i ekologii. Materialy mezhdunar. konf. IT+M&E'2015: vesenniaia sessiia*. Pod. red. E. L. Glorizova [New Information Technology in Medicine, Pharmacology, Biology and Ecology. International Conference IT+M&E'2016], Moscow, LLC «Institute of New Information Technologies», 2015, pp. 167–179 (in Russian).
3. Klenov G. I., Kozlov Y. F., Khoroshkov V.S. Sixty years of proton radiotherapy: results, problems and trends. *Meditsinskaya fizika* [Medical physics], 2015, no. 1 (65), pp. 86–90 (in Russian).
4. Chernyaev A. P., Kolyvanovaa M. A., Borshchegovskaya P. Yu. Radiation technology in medicine. Part 1. Medicine accelerators. *Moscow University Physics Bulletin*, 2015, vol. 70, iss. 6, pp. 457–465 (in Russian).
5. Belousov A. V., Bliznyuk U. A., Varzar S. M., Zagoruiko M. V., Osipov A. S., Chernyaev A. P. Accelerators in medicine. *Meditsinskaya fizika* [Medical physics], 2014, no. 1 (61), pp. 113–120 (in Russian).

## Please cite this article in press as:

Chernyaev A. P., Bliznyuk U.A., Borschegovskaya P. Yu., Varzar S. M., Rozanov V. V., Krusanov G. A., Belyanov A. A. Training of Medical Physicists for Clinical Bases in Lomonosov Moscow State University. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 238–243. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-238-243.

УДК 681.3(072)

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА, МАГИСТРАНТА И АСПИРАНТА



О. А. Черкасова<sup>1</sup>, С. В. Чурочкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Черкасова Ольга Алексеевна, 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, cherkasovaOA@yandex.ru

<sup>2</sup>Чурочкина Светлана Викторовна, 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, klechshevskaya@mail.ru

Цель данной работы состоит в том, чтобы познакомить выпускников различных ступеней высшего образования (бакалавриат, магистратура, аспирантура) с основными доку-

ментами, которые разъясняют требования, предъявляемые к написанию выпускной квалификационной работы и ее автореферата. Представлен литературный обзор с указанием работ, в которых прописаны четкие рекомендации по тому, как грамотно оформить автореферат выпускной квалификационной работы, какой имеет вид его структура и какая используется в ней терминология. В результате использования указанных требований студенты учатся создавать работы, доступные для понимания не только специалистов, но и широкого круга читателей. Кроме того, согласно новым требованиям, автореферат выпускной квалификационной работы должен быть выложен в сети Интернет. Следовательно, он чаще всего является единственным источником информации о ее содержании и результатах исследований. Опираясь на данный материал, студенты смогут преодолеть трудности в грамотном изложении и представлении как самой работы, так и положений на её



защиту. И от того насколько квалифицированно представлена научно-исследовательская работа, могут зависеть успешность их будущей профессиональной карьеры и конкурентоспособность на рынке труда.

**Ключевые слова:** выпускная квалификационная работа, критерии и требования.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-243-247

Одним из современных требований к выпускным квалификационным работам (ВКР) бакалавров и магистрантов и диссертациям соискателей является их представление в сети Интернет. Начальную информацию о работе содержит ее реферат (автореферат), который предваряет, впрочем, любую публикацию научного, обзорного или методического плана. Наличие реферата повышает информационный статус работы, способствует ее более широкому распространению [1], а также (и это не менее ценно) экономит время возможных читателей на знакомство с работой, поскольку реферат является кратким «вторичным» документом в отличие от «первичного» документа – ВКР и диссертации [2].

Если «театр начинается с вешалки», то в научных и квалификационных работах на себя обращает внимание, прежде всего, уровень лингво-дисциплинарной компетенции автора. В этой связи в [1] подчеркивается важность умения грамотно и стройно излагать мысли, а это определяется глубиной владения терминологией и материалом в целом.

Структура изложения в реферате должна отвечать рекомендуемому стандарту [2], но это формальный момент. Важно корректно отразить содержание работы, вызвать к ней интерес. Реферат – это совокупность рубрик, в каждой из которых характеризуется определенная сторона работы. Рубрики эти являются универсальными как для всех отраслей знаний, так и для работ различного уровня (выпускных работ бакалавров, магистров, аспирантов), в том числе диссертаций [3–5], что позволяет использовать апробированные «алгоритмы» построения рубрик рефератов и при защите студенческих ВКР, и при защите квалификационных работ более высокого «ранга». Но, естественно, конкретное наполнение рубрик реферата определяет соответствующая отрасль знания и степень высшего образования.

Первые фразы реферата связаны с обоснованием актуальности темы ВКР и диссертации и формулировкой цели работы. От того насколько

убедительны эти формулировки, зависит степень интереса, который может возникнуть у читателя к данной работе [6]. Собственно, качественная аргументация важна и при изложении в рубриках реферата других характеристик работы, касающихся задач и методов исследования, полученных новых результатов, защищаемых утверждений научного характера, их научно-практической значимости, вытекающих обобщений и др. [3, 7–11].

Включение аспирантуры в систему высшего образования в качестве завершающей его ступени требует более глубокого подхода к выполнению «выпускной работы», которая локальным актом Саратовского университета («Положением об итоговой государственной аттестации аспирантов», 2016) сопоставляется с собственно диссертацией. Это требует от аспиранта более глубокого знакомства с науковедческой терминологией [12–14], средствами представления ВКР как преимущественно научной работы [14–16]. Свою общую подготовленность соискатель ученой степени может проверить, ознакомившись с перечнем вопросов, которые сформулированы в [17] как вопросы выпускнику аспирантуры на государственном итоговом экзамене.

Необходимо иметь в виду, что в целом ВКР должна продемонстрировать уровень компетентностной подготовки выпускника вуза (бакалавриата, магистратуры, аспирантуры) согласно требованиям федеральных государственных стандартов [18–20].

В историческом контексте выпускникам полезно познакомиться с процедурами защит магистерских диссертаций в России и Европе в конце XIX – начале XX вв. [21–24].

Отмечаемая в данном обзоре литература ориентирована на выпускников различных ступеней высшего образования. Материалы названных публикаций отличаются логической выстроенностью и охватывают все нюансы, которые необходимо продемонстрировать при представлении выпускной квалификационной работы. Знакомство с этими публикациями будет также способствовать психологической подготовке выпускника к публичной защите своего завершающего труда.

#### Список литературы

1. Аникин В. М., Поизнер Б. Н. Коммуникационная функция автореферата и лингво-дисциплинарная



- компетенция диссертанта // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2013. Т. 13, вып. 1. С. 80–86.
2. ГОСТ Р 7.0.11-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. М. : Стандартинформ, 2012. 12 с.
  3. Аникин В. М., Усанов Д. А. Диссертация в зеркале автореферата : метод. пособие для аспирантов и соискателей ученой степени естественно-научных специальностей. 3-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2013. 128 с.
  4. Соснин Э. А., Пойзнер Б. Н. Осмысленная научная деятельность : Диссертанту о жизни знаний, защищаемых в форме положений. М. : ИНФРА-М ; РИОР, 2015. 148 с. DOI: 10.12737/5737.
  5. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н., Усанов Д. А. Схема поаспектной характеристики диссертации: правила, рекомендации, примеры // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 3. С. 137–150.
  6. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. Какова природа интересного, или дефиниции науки и научности – эпистемологический компонент профессиональной компетенции (радио) физика как инженера-исследователя // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 10-3. С. 118–120.
  7. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. Как диссертанту аргументировать достоверность научных положений и результатов, выносимых на защиту // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 6. С. 105–108.
  8. Аникин В. М., Усанов Д. А. Автореферат диссертации : функции, структура, значимость // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2008. Т. 8, вып. 2. С. 61–73.
  9. Аникин В. М., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н., Соснин Э. А. Защищаемое положение в диссертации как трансдисциплинарный научный жанр // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8-3. С. 300–303.
  10. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. Провокация магистранта на вербализацию защищаемого научного положения как прием когнитивного менеджмента // Вестн. Том. гос. ун-та. Сер. Философия. Социология. Политология. 2013. № 2 (22). С. 15–20.
  11. Аникин В. М., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н. Диссертанту о восприимчивости, числовой оценке и защите научных результатов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 6. С. 25–34.
  12. Аникин В. М. Физика и интеллектуальное саморазвитие личности // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 4. С. 117–120.
  13. Аникин В. М. О «жизни» научных знаний // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. Т. 23, № 2. С. 67–73.
  14. Аникин В. М., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н. Диссертация : характеристики научности // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. / под ред. проф. А. В. Ляшенко. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 16. С. 105–118.
  15. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. Научное руководство аспирантами : «внутренние» и «внешние» регуляторы // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 1. С. 83–88.
  16. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. «Предзащита» диссертации : формальные требования и традиции // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 2. С. 95–102.
  17. Аникин В. М., Пойзнер Б. Н. Государственная итоговая аттестация аспиранта : от формальности к превентиве // Alma Mater (Вестник высшей школы). 2015. № 11. С. 17–21.
  18. Черкасова О. А., Чурочкина С. В. Компетентностный подход при анализе освоения образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 03.03.02 Физика // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. / под ред. проф. А. В. Ляшенко. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2014. Вып. 17. С. 121–127.
  19. Черкасова О. А., Чурочкина С. В. К вопросу о профессиональной подготовке магистров по направлению 03.04.02 «Физика» // Образование в современном мире : сб. науч. ст. / под ред. Ю. Г. Голуба. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 10. С. 202–208.
  20. Черкасова О. А., Черкасова С. А. Формирование карт компетенций при разработке образовательных программ прикладного бакалавриата на основе ФГОС ВО // ИНЖИНИРИНГ ТЕХНО 2015 : сб. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. / под ред. Н. В. Бекренева, У. В. Боровских. Саратов : Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. Т. 2. С. 174–180.
  21. Аникин В. М., Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н. «Почти-следить за изменчивыми судьбами научных теорий» // Образование в современном мире : сб. науч. ст. / под ред. Ю. Г. Голуба. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. Вып. 10. С. 37–41.
  22. Аникин В. М. Альберт Эйнштейн и Питирим Сорокин : истории диссертационных защит // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 3. С. 52–76.
  23. Аникин В. М. «Фабрика молодых физиков» П. Н. Лебедева и Саратовский университет // УФН. 2016. Т. 186, № 2. С. 169–173. DOI: 10.3367/UFN.0186.201602e.0169.
  24. Феномен научной школы : история, типология получения и передачи знаний, психология коммуникации / В. М. Аникин, Б. Н. Пойзнер, Э. А. Соснин, А. В. Шувалов ; под общ. ред. В. М. Аникина. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2015. 232 с.

#### Образец для цитирования:

Черкасова О. А., Чурочкина С. В. Характеристики выпускной квалификационной работы бакалавра, магистранта и аспиранта // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 243–247. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-243-247.



## Characteristics of Final Qualifying Works by Bachelors, Masters and Post-Graduates

O. A. Cherkasova<sup>1</sup>, S. V. Churochkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Olga A. Cherkasova, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, cherkasovaOA@yandex.ru

<sup>2</sup>Svetlana V. Churochkina, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, klechshevskaya@mail.ru

**Background and Objectives:** The goal of this article is to acquaint for graduates of different levels of the higher education (bachelor's, master's, and PhD degrees) with the main documents, which clarified requirements regarding to the writing of the graduate qualification work as well as its abstract. **Results:** In the article presented the review of the literature with the indication of articles at which clear recommendations about how one can design skillfully the abstract of the graduate qualification work, what form of its structure and what terminology has been used in the abstract, have been prescribed. As a result of utilizing the requirements mentioned above, students learn to create works accessible for the understanding not only by professionals but also by reading public. Moreover, in accordance with new rules, the abstract of graduate qualified work must be posted in the Internet. Therefore, it is as often as not the only source of the information about its content and results of the research. As a result, by relying on this material, students will be able to overcome difficulty in the competent rendering and representation of both the job and propositions to be submitted for the defense of the graduate qualification job. **Conclusion:** In turn, success of student's future professional carrier and their competitiveness on the job market can depend on how skillfully the scientific research has been presented.

**Key words:** final qualifying work, criteria and requirements.

## References

1. Anikin V. M., Poizner B. N. Communicative function of thesis and professional grade of dissertator. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2013, vol. 13, iss. 1, pp. 80–86 (in Russian).
2. State Standard P 7.0.11-2011. *Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Sistema standartov po informatcii, biblioteknomu i izdatel'skomu delu. Dissertacija i avtoreferat dissertatsii. Struktura i pravila oformlenija* [National standard of the Russian Federation. System of standards on information, Librarianship and Publishing. Thesis and dissertation. Structure and Rules of Presentation]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 12 p. (in Russian).
3. Anikin V. M., Usanov D. A. *Dissertatsiia v zerkale avtoreferata : metodicheskoe posobie dlja aspirantov i soiskatelei uchenoi stepeni estestvenno-nauchnykh spetsial'nostei. 3-e izd., pererab. i dop.* [Dissertation in the mirror of the abstract]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013. 128 p. (in Russian).
4. Sosnin E. A., Poizner B. N. *Osmyslennaja nauchnaia deiatel'nost': Dissertantu o zhizni znanii, zashchishchaemykh v forme polozenii* [Understanding scientific work: about knowledges life, which author of thesis defends as assertions]. Moscow, RIOR Publ., INFRA-M Publ., 2015. 148 p. DOI: 10.12737/5737 (in Russian).
5. Anikin V. M., Poizner B. N., Usanov D. A. Outline of thesis general characteristics: rules, recommendations, samples. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2009, vol. 17, no. 3, pp. 137–150 (in Russian).
6. Anikin V. M., Poizner B. N. What is a nature of interesting, or definitions of a science and scientific character are an epistemological component of the professional competence of (radio)physics as an engineer-investigator. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 10-3, pp. 118–120 (in Russian).
7. Anikin V. M., Poizner B. N. How an applicant justify the reliability of scientific propositions and results which have to be submitted for the defence. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2011, vol. 54, no. 6, pp. 105–108 (in Russian).
8. Anikin V. M., Usanov D. A. Abstract of dissertation: functions, structure, importance. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2008, vol. 8, iss. 2, pp. 61–73 (in Russian).
9. Anikin V. M., Izmailov I. V., Poizner B. N., Sosnin E. A. The defended statement of the thesis as a transdisciplinary scientific genre. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika – Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 8-3, pp. 300–303 (in Russian).
10. Anikin V. M., Poizner B. N. A Provoking for undergraduate to verbalization of scientific judgment in master thesis as a method of knowledge management. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Filosofija. Sotsiologija. Politologija*, 2013, no. 2 (22), pp. 15–20 (in Russian).
11. Anikin V. M., Izmailov I. V., Poizner B. N. About perception, numerical rating and protection of scientific results. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2014, vol. 22, no. 6, pp. 25–34 (in Russian).
12. Anikin V. M. Physics and intellectual development of personality. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2014, vol. 22, no. 4, pp. 117–120 (in Russian).
13. Anikin V. M. On «the life» of scientific knowledge. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2015, vol. 23, no. 2, pp. 67–73 (in Russian).
14. Anikin V. M., Izmailov I. V., Poizner B. N. Dissertation: scientific characteristics. *Geteromagnetnaja mikroelektronika* [Heteromagnetic microelectronics]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2014, iss.16, pp. 105–118 (in Russian).
15. Anikin V. M., Poizner B. N. Scientific supervision by graduate students: «internal» and «external» regulators. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*. 2015, vol. 15, iss. 1, pp. 83–88 (in Russian).



16. Anikin V. M., Poizner B. N. «Pre-defense» of thesis: formal requirements and traditions. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2014, vol. 22, no. 2, pp. 95–10 (in Russian).
17. Anikin V. M., Poizner B. N. State final attestation of post-graduate: from formality to preventiveness. *Alma Mater (Vestnik Vyssei Shkoly)*, 2015, no. 11, pp. 17–21 (in Russian).
18. Cherkasova O. A., Churochkina S. V. Competency approach by analysis of development of educational program for bachelors of physics. *Geteromagnitnaia mikroelektronika* [Heteromagnetic microelectronics]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2014, iss.17, pp. 121–127 (in Russian).
19. Cherkasova O. A., Churochkina S. V. To a question of vocational training of masters in the direction of the physicist. *Education in the modern world: Collection of scientific articles*. Sb. nauch. st. Pod red. Iu. G. Goluba. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2015, iss. 10, pp. 202–208 (in Russian).
20. Cherkasova O. A., Cherkasova S. A. Formation of cards of competences when developing educational programs of the applied bachelor degree on the basis of FSES. *INZHINIRING TEKhNO 2015: sbornik statei III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 tomakh* [Engineering Techno: Proceedings of the Third International Conference: in 2 vol.]. Saratov, Izd-vo Rait-Expo, 2015, vol. 2, pp. 174–180 (in Russian).
21. Anikin V. M., Izmailov I. V., Poizner B. N. It is instructive to watch changeable destinies of scientific theories. *Education in the modern world: Collection of scientific articles*. Sb. nauch. st. Pod red. Iu. G. Goluba. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2015, iss. 10, pp. 37–41 (in Russian).
22. Anikin V. M. Albert Einstein and Pitirim Sorokin: history of dissertation defenses. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 52–76 (in Russian).
23. Anikin V. M. P. N. Levedev's "factory of young physicists" and Saratov University. *Physics-Uspekhi*. 2016, vol. 59, no. 2, pp. 162–166. DOI: 10.3367/UFNe.0186.201602e.0169.
24. Anikin V. M., Poizner B. N., Sosnin E. A., Shuvalov A. V. *Fenomen nauchnoi shkoly: istoriia, tipologiia polucheniia i peredachi znaniia, psikhologiia kommunikatsii* [Phenomenon of school of sciences: history, typology of receiving and transfer of knowledge, psychology of communications]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2015. 232 p. (in Russian).

**Please cite this article in press as:**

Cherkasova O. A., Churochkina S. V. Characteristics of Final Qualifying Works by Bachelors, Masters and Post-Graduates. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 243–247. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-243-247.



## ХРОНИКА

УДК 001.8

### ПОСЛЕСЛОВИЕ К ЮБИЛЕЮ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА СГУ

**В. М. Аникин**

Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, декан физического факультета, 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

Приводится информация о встрече выпускников физического факультета Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского, посвященной 70-летию факультета. В становлении физического образования и науки в Саратовском университете принимали участие великие русские физики П. Н. Лебедев и Н. Н. Семёнов, лауреат Нобелевской премии 1956 г. Выпускники факультета различных специальностей (по вакуумной и твердотельной электронике, радиофизике, оптике, химической физике, лазерной физике и биофотонике) отметили юбилей факультета 19 февраля 2016 г.

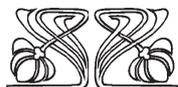
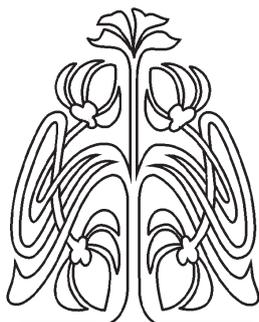
**Ключевые слова:** Саратовский университет, физический факультет.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-248-252

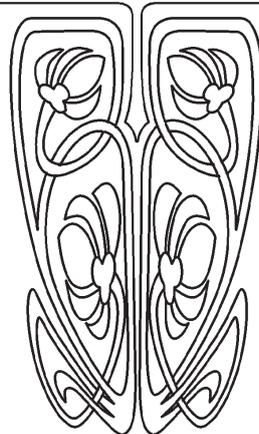
Учебный 2015/16 год стал семидесятым в истории физического факультета Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского в рамках самостоятельного структурного подразделения. До июля 1945 г. физическое образование и наука развивались в Саратовском университете в рамках других структур, в том числе физико-математического факультета.

Юбилейный год был отмечен проведением крупных научных (Симпозиум по оптике и биофотонике [1]) и научно-образовательных (Дни науки для школьников) мероприятий, подчеркнута торжественным вручением дипломов выпускникам 2015 г., изданием монографии «Феномен научной школы: история, типология получения и передачи знаний, психология коммуникаций» [2], статей, посвященных истории факультета, в журналах «Успехи физических наук» [3, 4], «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика» [5], «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика» [6–11], научных сборниках «Гетеромагнитная микроэлектроника» [12] и «Вопросы прикладной физики» [13].

В преддверии заключительной праздничной встречи, состоявшейся 19 февраля 2016 г. в Актовом зале 10-го корпуса СГУ, в адрес физического факультета поступило 70 поздравлений от ведущих образовательных, научно-исследовательских центров и научно-производственных организаций России, а также от выпускников факультета разных лет и коллег из России и из-за рубежа. Уже по адресам отправителей поздравлений можно судить о том заметном месте в научном, техническом и образовательном пространстве



**ПРИЛОЖЕНИЯ**





Торжественное заседание, посвященное 70-летию со дня основания физического факультета Саратовского университета, 19 февраля 2016 г. (фото В. Викторовой)

России, которое факультет заслужил за годы своего существования (более подробно см. в [11]), а также о его международных научных связях.

На встрече прозвучали приветствия от Министерства образования и науки Российской Федерации, Правительства Саратовской области, руководства СГУ и его структурных подразделений, Саратовского научного центра РАН, Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Института проблем точной механики и управления РАН, Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, АО «НПП «Алмаз»», АО «Алмаз-Фазотрон», Саратовского филиала ФГУП «НПП автоматики и приборостроения имени академика Н. А. Пилюгина» ПО «Корпус», Саратовского радиоприборного завода, ОАО «Гипрониигаз», НПК «Оптолинк», НПФ «Этна», Школы бизнеса «Диполь», Физико-технического лицея № 1 г. Саратова.

Собравшиеся были ознакомлены с поздравительными приветствиями от организаций (структурных подразделений организаций) высшего образования – Московского, Астраханского, Башкирского, Волгоградского, Нижегородского и Томского университетов, Южного федерального университета, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных

технологий, механики и оптики, Красноярского государственного медицинского университета имени проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого; от научно-исследовательских организаций (подразделений организаций) – Института химической физики имени Н. Н. Семёнова РАН, Объединенного института ядерных исследований, Института органической и физической химии имени А. Е. Арбузова РАН, Института систем обработки изображений РАН, Института прикладной физики РАН, Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Тихоокеанского океанологического института Дальневосточного отделения РАН, Института физических проблем РАН имени П. Л. Капицы; от научно-производственных организаций – АО НПП «Исток» имени А. И. Шохина, ОАО «Дукс», ПАО «Тантал» Института критических технологий, ОАО «КБ Электроприбор», Саратовской лаборатории судебной экспертизы.

С интересом были встречены приветствия выпускников факультета, ставших известными учеными: академика РАН А. В. Чаплика, академика РАН Л. П. Питаевского, докторов наук, профессоров Е. Е. Никитина, А. А. Кураева, А. А. Афанасьева, А. П. Низовцева, А. Б. Неймана, а также приветствия коллег – докторов наук профессоров В. Д. Шалфеева, В. А. Степанова, историка, почетного профессора СГУ А. И. Авруса.



Среди зарубежных авторов поздравительных посланий – люди, знающие факультет не понаслышке. Это профессора Werner Ebeling (почетный профессор СГУ), Juergen Kurths (почетный профессор СГУ), Lutz Schimansky-Geier (почетный профессор СГУ), Georg Gaertner, Eckehard Schöll (Германия), Jean-Michel Roquais (Франция), Ming-Fa Lin (Тайвань), М. В. Королевич (Беларусь).

С волнением воспринимаются послания выпускников физического факультета различных лет, начиная с самых первых выпусков. В них проскальзывают нотки ностальгии, отдается дань учившим их профессорам и преподавателям, вспоминается студенческая аура, содержатся добрые и оптимистические пожелания, выражается удовлетворение от выбранной профессии.

Своеобразным рефреном прозвучали и стихи, присланные физиками факультета трех поколений Биленко:

*Куда бы нас ни бросила судьбина,  
И счастье куда б ни повело,*

*Все те же мы: нам целый мир – чужбина,  
Нам третий корпус – Царское село!*

Основное время на встрече было отведено содержательным выступлениям заведующих кафедрами, слагающими физический факультет или входившими ранее в него на протяжении полувека: член-корреспондента РАН Д. И. Трубецкова (кафедра электроники, колебаний и волн), Д. А. Усанова (кафедра физики твердого тела), В. С. Анищенко (кафедра радиофизики и нелинейной динамики), Л. М. Бабкова (кафедра теоретической физики), О. Е. Глуховой (кафедра радиотехники и электродинамики), а также профессора кафедры оптики и биофотоники Ю. П. Синичкина.

Декан факультета осветил главные сюжетные и «генеалогические» линии в истории факультета, подчеркнув непреходящую роль двух корифеев отечественной физики в становлении и развитии факультета – Петра Николаевича Лебедева и Николая Николаевича Семёнова.



Диплом доктора физико-математических наук и аттестат профессора первого заведующего кафедрой физики Саратовского университета, магистранта П. Н. Лебедева Владимира Дмитриевича Зёрнова (оригиналы документов хранятся в Музее физических приборов и лекционных демонстраций физического факультета СГУ)



«Разнообразили» вечер выступления студентов с художественными номерами. Коллектив «Фантазия» представил номер со световыми эффектами (в полной темноте). Ансамбль «Линия танца» показал настоящую сальсу, а участники коллектива «Неваляшки» были встречены теплыми аплодисментами за «Русскую пляску». Ведущая вечера, выпускница физфака Мария Демидова вместе со студентами Института химии представила яркий номер «Улетай» – симбиоз вокала и дефиле в этническом стиле. Приятным сюрпризом стало приветствие саратовского физико-технического лица № 1 и исполнение школьным трио старинного романса «Не уходи, побудь со мною» на оригинальные слова, «приличествующие» моменту.

Философское осмысление юбилейной даты дано в письме выпускника факультета 1962 г. Леонида Минкина: «Каждый год добавляет факультету зрелости и традиций. Физическому факультету есть чем гордиться. Желаю дальнейшего процветания физическому факультету, успехов его студентам и преподавателям».

Всем очным и заочным участникам встречи мы выносим свою искреннюю благодарность за оказанное внимание, добрые пожелания и поддержку физического братства! Отчет о юбилейной встрече помещен и на сайте СГУ: <http://sgu.ru/node/89536>. Электронные версии всех приветствий можно найти на интернет-странице физического факультета СГУ: <http://sgu.ru/node/89003>.

### Библиографический список

1. Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM–2015 : материалы 3-го междунар. симп. по оптике и биофотонике и 19-й междунар. науч. школы по оптике, лазерной физике и биофотонике, посвящ. 70-летию физ. фак. Сарат. гос. ун-та / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. Саратов : Изд-во «Новый ветер», 2015. 212 с.
2. Аникин В. М., Поизнер Б. Н., Соснин Э. А., Шувалов А. В. Феномен научной школы : история, типология полужения и передачи знаний, психология коммуникаций / под общ. ред. В. М. Аникина. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2015. 232 с.
3. Аникин В. М. «Фабрика молодых физиков» П. Н. Лебедева и Саратовский университет // УФН. 2016. Т. 186, вып. 2. С. 169–173. DOI: 10.3367/UFN.0186.201602e.0169.
4. Аникин В. М. Физик-инноватор, земляк, учитель и друг Н. Н. Семёнова Владимир Иванович Кармилов // Трибуна УФН. Статья № 128. Опубликовано online 19 марта 2016. URL: <https://ufn.ru/tribune/trib128.pdf>
5. Аникин В. М. Наши первые учителя : страницы биографий П. Н. Лебедева и Н. Н. Семёнова // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, № 1. С. 75–83. DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-1-75-83.
6. Аникин В. М. «Приобретать умение делать физические измерения и исследования» : к 100-летию физического образования и физической науки в Саратове // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 53–58.
7. Аникин В. М. Физический факультет в XXI веке // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2014. Т. 14, вып. 2. С. 65–71.
8. Аникин В. М. Научная школа Петра Николаевича Лебедева и Саратовский университет // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 2. С. 49–52.
9. Аникин В. М. Физик-инноватор, земляк, учитель и друг Н. Н. Семёнова Владимир Иванович Кармилов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 1. С. 44–54.
10. Аникин В. М., Усанов Д. А. Николай Николаевич Семёнов : волжские сюжеты жизни // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 2. С. 109–121. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-2-109-121.
11. Усанов Д. А., Аникин В. М. Саратовские научные и педагогические школы по физике (к 80-летию образования Саратовской области) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 3. С. 178–190. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-3-178-190.
12. Аникин В. М. Физика в Саратовском университете. К 100-летию физического института и 70-летию физического факультета // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. / под ред. проф. А. В. Ляшенко. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. Вып. 16. С. 78–84.
13. Аникин В. М. Физический факультет СГУ : памятные даты // Вопросы прикладной физики : межвуз. науч. сб. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2015. Вып. 22. С. 3–8.

### Образец для цитирования:

Аникин В. М. Послесловие к юбилею физического факультета СГУ // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 248–252. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-248-252.

### Afterword to the Anniversary of the Faculty of Physics of SSU

#### V. M. Anikin

Valery M. Anikin, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia, [anikinvm@info.sgu.ru](mailto:anikinvm@info.sgu.ru)

We present information on the meeting of graduates from physical faculty of Saratov National Research State University, dedicated to the

70th anniversary of the faculty. Physical education in the university was formed under the influence of the greatest Russian physicists Peter N. Lebedev and Nikolai N. Semenov, the winner of the 1956 Nobel Prize. Graduates from the faculty of various specialties (on vacuum and solid state electronics, radiophysics, optics, chemical physics, laser physics and biophotonics) celebrated the anniversary of the faculty on February 19, 2016.

**Key words:** Saratov University, Faculty of Physics.



## References

1. *Problemy opticheskoy fiziki i biofotoniki. SFM – 2015* [Problems of optical Physics and Biophotonics] : proc. of 3rd Int. Symp. On Optics and Biophotonics & 9th Int. Scientific School on Optics, Laser Physics and Biophotonics, devoted to 70th Ann. of Phys. Faculty of SSU. Eds. G. V. Simonenko and V. V. Tuchin. Saratov : Izd-vo «Novyj veter», 2015. 212 p. (in Russian).
2. Anikin V. M., Poizner B. N., Sosnin E. A., Shuvalov A. V. *Fenomen nauchnoy shkoly: istoriya, tipologiya poluchenija i peredachi znanij, psihologija 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).
3. Anikin V. M. P. N. Lebedev's «Factory of Young Physicists» and Saratov University. *Phys. Usp.*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 162–166. DOI: 10.3367/UFNe.0186.201602.e.0169.
4. Anikin V. M. Vladimir I. Karmilov, Physicist, Innovator and Nikolai N. Semenov's Countryman, Teacher, Friend. *Tribuna UFN*. Paper no.128. Published online. 2016, March 19. URL: <https://ufn.ru/tribuna/trib128.pdf> (in Russian).
5. Anikin V. M. Our first teaches: pages of biographies by P. N. Lebedev and N.N. Semenov. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 24, no. 1, pp.75–83. DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-1-75-83 (in Russian).
6. 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).
7. Anikin V. M. Physical Faculty in the XXI century. To the 70th Anniversary of Physical Faculty of Saratov State University. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2014, vol. 14, iss. 2, pp. 65–71 (in Russian).
8. Anikin V. M. Scientific P. N. Lebedev's School and Saratov University. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2015, vol. 15, iss. 2, pp. 49– 52 (in Russian).
9. Anikin V. M. Vladimir I. Karmilov, Physicist, Innovator and Nikolai N. Semenov's Countryman, Teacher, Friend. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 1, pp. 44–54. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-1-44-54 (in Russian).
10. Anikin V. M., Usanov D. A. Nikolai N. Semenov: Volga Region Themes of the Life. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 2, pp. 47–59. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-2-109-121 (in Russian).
11. 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. DOI: 10.18500/1817-3020-2016- 16-3-178-190 (in Russian)..
12. Anikin V. M. Physics in Saratov University. To the 100 Anniversary of the Physical Institute and the 70th Anniversary of Faculty of Physics. *Geteromagnitnaia mikroelektronika* [Heteromagnetic microelectronics]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2014, iss. 16, pp. 78–84 (in Russian).
13. Anikin V. M. Physical Faculty of Saratov University: Memorable Dates. *Voprosy prikladnoi fiziki* [Problems of Applied Physics]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2015, iss. 22, pp. 3–8 (in Russian).

---

### Please cite this article in press as:

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. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-248-252.

---